PNC ~~I9410 87-026~~ TN 9410 87-206

小型ロボットを用いたGe検出器の校正

１９８７年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
安全管理部

内部資料
PNC TN9410 87-206
1987年10月

小型ロボットを用いたGe検出器の校正

川村　将[*1]　古田定昭[*2]
田口恵次[*3]　進藤勝利[*1]
五十嵐孝行[*4]

要　旨

ゲルマニウム半導体検出器は、γ線に対して優れた分解能を持つためγ線放出核種の分析装置として広く用いられている。ゲルマニウム半導体検出器により定量分析を行うには、あらかじめピーク計数効率の測定評価を行い、測定試料に対して効率校正をする必要がある。環境試料中の微量放射能分析を行うには、検出感度を高めるために大きな容積試料となるが、それに合わせて効率校正のための標準γ線線源も同体積を持った線源が使用される。その標準γ線線源は、それぞれの測定試料容器に応じて独自に作成しなければならない。また、γ線の自己吸収補正を行う場合には、測定試料の密度を変える必要があるため線源の数も多くなり、作成に際し多大の労力を費やすとともに保管管理も大変である。

以上の問題点を解決するため、密封標準点線源を用いた容積試料に対するピーク計数効率の校正方法が一部で報告されているが、密封標準点線源を任意の空間で多点保持することが必要などのため現在未だ実用化に到っていない。

そこで我々は、近年のロボット技術・コンピュータ技術の進歩によりこれらの問題点に対処することが可能と考え、それらを利用して実用化への試みを行い、その結果をまとめたので報告する。

＊1　安全管理部安全対策課環境係

＊2　安全管理部放射線管理課第2係

＊3　原子力技術株式会社（安全対策課環境係所属）

＊4　安全管理部安全対策課長

目　　次

1. はじめに

ゲルマニウム半導体検出器は、γ線に対して優れた分解能を持つためγ線放出核種の分析装置として広く用いられている。ゲルマニウム半導体検出器により定量分析を行うには、あらかじめピーク計数効率の測定評価を測定試料に対して行っておく必要がある。ゲルマニウム半導体検出器の有感部分は、NaI(Tl) シンチレータのように幾何学的形状から効率を一元的に算出することは困難であり、効率校正は標準となるγ線線源を用いて行うのが一般的である。測定試料は一定の容積を持つのが普通であり、特に微量放射能分析を行う環境試料においては、検出感度を高めるために大きな容積試料となるが、それに合わせて標準γ線線源も体積を持った線源が使用される。標準線源を作製するためには、通常非密封の放射性同位元素を測定試料を模擬した適当な母材に均一に分散させ、容器に充塡して幾何学的効率を測定試料と同じにする必要がある。測定試料を容器に充塡する量が異なれば、それと同容積の標準線源を作製しなければならない。さらに、測定試料自身によるγ線の自己吸収の補正を行う場合も、自己吸収の異なる標準線源を作成することになり、その数は非常に多くなり、作製に際しても多大な労力を費やすとともにその保管管理も大変である。

以上のような問題点を解決するため、密封標準点線源を移動することにより容積線源を模擬させ、ピーク計数効率を算出する方法が一部の機関で報告されているが[1]、密封標準点線源を任意の空間上で多点にわたって保持することが必要であること、得られるデータ量が多く、その解析が困難である等の問題点が存在するため、未だ実用化には至っていない。しかし、近年のロボット技術、コンピュータ技術の発達により、これらの問題点を解決することが可能と考え、我々は、小型のロボットとパーソナルコンピュータを利用して実用化を試みたので、その結果を報告する。

2. 原理及び手法

2.1 原　理

ゲルマニウム半導体検出器のピーク計数効率を校正するための容積線源は、点線源の集合として考えることができるので、円柱状容積線源と円筒型（同軸型）ゲルマニウム半導体検出器が同じ中心軸状にあると仮定すると、容器内での点線源の位置（半径 r，角度 θ，高さ h）を円柱座標で表すことができる。（図－１）

放射性物質が体積Ｖに均一に分布していると仮定すれば、点（x, y, z)におけるエネルギーＥのγ線ピーク計数効率を ϵ (x, y, z, E) として容積試料の効率は、次式のように表される。

$$\epsilon_v(E) = \frac{1}{V}\int_v \epsilon(x, y, z, E)\,dv \qquad (2\text{-}1)$$

$\epsilon_v(E)$：容積試料におけるエネルギーＥを持つγ線のピーク計数効率

しかし、図－１に示すように、ゲルマニウム半導体検出器の形状が円筒形であり測定試料として円筒形を考えると２－１式は、円筒座標系に変換して次のように表される。

$$\epsilon_v(R, H, E) = \frac{1}{V}\int_0^H\int_0^R\int_0^{4\pi} r\,\eta(E, r, \theta, h)\,d\theta\,dr\,dh \qquad (2\text{-}2)$$

$\epsilon_v(R, H, E)$：半径Ｒ、高さＨの円筒形試料におけるエネルギーＥを持つγ線のピーク計数効率

$\eta(E, r, \theta, h)$：点（r, θ, h）におけるエネルギーＥを持つγ線の効率

ここで、ピーク計数効率がゲルマニウム半導体検出器の軸に対象（θに関して一定）とすれば、次のように表される。

$$\epsilon_v(R, H, E) = \frac{1}{SH}\int_0^H\int_0^R 2\pi r\,\eta(E, r, h)\,dr\,dh \qquad (2\text{-}3)$$

$$= \frac{1}{H}\int_0^H \zeta(E, h)\,dh$$

上記積分のうち、

$$\zeta(E,h)=\frac{1}{S}\int_{0}^{R}2\pi r\,\eta(E,r,h)\;dh \qquad (2\text{-}4)$$

を次の方法により求めることができる。

2.2 手　法

前述のη (E,r,h)は、E, r及びhをパラメータとして実験により求め、適合関数を決めて数値積分を行い、ζを決めることで求められる。

図－2に示すとおり、試料容器の底面からの垂直距離がh、中心軸からの半径方向の距離をrとなる位置に放射能標準密封点線源を置いてγ線スペクトルを測定する。各r点における点線源ピーク計数効率を求め、次に各データよりピーク計数効率の適合関数を決める。そのピーク計数効率の関数を半径Rの模擬面線源に相当するピーク計数効率を数値積分により求める。

$$\zeta(E,h)=\int_{0}^{R}2\pi r\,\eta(E,r,h)\;dr/\pi R^{2} \qquad (2\text{-}5)$$

今回の実験では、放射能標準密封点線源をrとなる点に置く方法を小型ロボットで行い、多量のデータ解析をパーソナルコンピュータを利用して行った。

3. 測定装置及び測定方法

3.1 測定システム

全体の測定システム構成を図－3に示す。

本システムにおいては、密封点線源の位置を決めるために小型ロボット（三菱電気RM-101）を使用した。この小型ロボットは、ウエスト、ショルダ、エルボ、リスト、ハンドをモータで駆動制御することにより、任意の点に密封点線源を保持するものである。その外観を図－4及び写真－1に、また仕様を表－1に示す。ロボットを制御するために卓上ディスクトップコンピュータＹＨＰシリーズ 200モデル16S(9816S)を用い GP-IBインターフェースをセントロニクスインターフェースに変換して使用した。このコンピュータは、768kB のメモリ容量を持ち、外部記憶媒体として 3.5インチのマイクロフロッピィディスク２基(260kB×2)を実装しており、ロボットの制御だけでなく、マルチチャンネル波高分析装置に接続してGe(Li)検出器で得られたγ線スペクトルデータの解析を行い、ピーク効率の算出にも利用している。その外観を写真－2に示す。今回効率測定に使用したGe(Li)検出器はCANBERRA製モデル7229-7500,一端開放型同軸形（CLOSED END COAXIAL）有感面積（端）19.63 ㎠、相対効率約 20%のものである。

3.2 ロボット制御

3.2.1 制御理論

ロボットの制御理論に関しては、参考文献中[5]に詳しく記述されているのでここでは、今回適用した範囲についてのみ述べる。

本システムでは、ロボットが点線源を任意の空間に保持する役割を持つが、検出器及び測定試料の座標系である円筒形座標に合ったロボットを使用するのが制御及び位置の精度等で理想的と考えられる。しかし、今回は比較的入手が容易であった多関節型ロボットを使用した。多関節型のロボットは、どの関節をどれだけ動かしたら手先がどの位置に来るかを計算することは容易でないが、それだけ人間の手に近い複雑な動きが可能であり、今後のシステムの発展を想定した場合十分対応できると考えられる。多関節のロボットは、各関節の移動量から手先の位置を計算するため、一般にマ

トリックスを用いた座標変換行列が用いられている。座標変換行列は、各リンク（関節に相当）の座標系を関係づける4次のA行列というものが、次のように与えられている。

$$A_n = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\ \cos\theta & \sin\theta\ \sin\alpha & a\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta\ \cos\alpha & -\cos\theta\ \sin\alpha & a\sin\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ここで

A_n：　座標系 n-1と nを関係づける行列

θ：　Z_{n-1} 軸まわりの回転角

d：　Z_{n-1} に沿って並進する距離

a：　X_n に沿って並進する距離

α：　X_n 軸まわりの回転角

このA行列を使用してリンク座標系6のロボット先端の座標T_6を表示することができる。

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$$

今回使用したロボットの場合座標系を図－5で考えると各リンクパラメータは、表－2のようになる。これらの値を代入すれば、A行列は、以下のように与えられる。

$$A_1 = \begin{vmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2a_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & C_4 a_4 \\ S_4 & 0 & C_4 & S_4 a_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_5 = \begin{vmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_6 = \begin{vmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ここで

$$Cn = \cos\theta n$$

$$Sn = \sin\theta n$$

先端の座標 T_6 を

$$T_6 = \begin{vmatrix} n_x & 0_x & a_x & p_x \\ n_y & 0_y & a_y & p_y \\ n_z & 0_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

とすれば

$$n_x = C_1 [C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_6] - S_1 S_5 C_6$$

$$n_y = S_1 [C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_6] + C_1 S_5 C_6$$

$$n_z = S_{234} C_5 C_6 + C_{234} S_6$$

$$0_x = -C_1 [C_{234} C_5 S_6 + S_{234} C_6] + S_1 S_5 S_6$$

$$0_y = -S_1 [C_{234} C_5 S_6 + S_{234} C_6] - S_1 S_5 S_6$$

$$0_z = -S_{234} C_5 S_6 + C_{234} C_6$$

$$a_x = C_1 C_{234} S_5 + S_1 C_5$$

$$a_y = S_1 C_{234} S_5 - C_1 C_5$$

$$a_z = S_{234} S_5$$

$$p_x = C_1 [C_{234} a_4 + C_{23} a_3 + C_2 a_2]$$

$$p_y = S_1 [C_{234} a_4 + C_{23} a_3 + C_2 a_2]$$

$$p_z = S_{234}a_4 + S_{23}a_3 + S_2a_2$$

ここで

$$C_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$S_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$a_2 = 240(\mathrm{mm})$$

$$a_3 = 200(\mathrm{mm})$$

$$a_4 = 150(\mathrm{mm})$$

また、ハンドの向きは、ロール，ピッチ，ヨー座標系で決定し、その位置は並進交換を行う。その座標系を図－6に示す。

$$\mathbf{PRY}(\phi, \theta, \psi)\ \mathbf{T}rans(P_x, P_y, P_z)$$

$$= \begin{vmatrix} \cos\phi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\ \sin\theta\ \cos\psi - \sin\theta\sin\psi & Px \\ \sin\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\ \sin\theta\ \cos\psi - \cos\phi\cos\psi & Py \\ \sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ここで

ϕ ： ハンドのｚ軸方向の回転

θ ： ハンドのｙ軸方向の回転

ψ ： ハンドのｘ軸方向の回転

Ｐx, Ｐy, Ｐz: ハンドの座標値

この行列は、$\mathbf{T}_6$ 行列と同等であるので次式が成立する。

$$\mathbf{PRY}(\phi, \theta, \psi)\ \mathbf{T}rans(P_x, P_y, P_z) = \mathbf{T}_6 \quad (3\text{-}1)$$

上式でハンドの向きで ϕ, θ, ψ をその位置で P_x, P_y, P_z を与えることにより $\theta_1 \sim \theta_6$ を計算することができる。

3.2.2 ロボット制御

本システムにおけるロボットの動作は、基本的に与えられた点 (x, y, z)とハンドの向きを与えることにより制御を行う。例として点Ａから点Ｂに移動する場合の制御フローを図－７に示す。

今回使用した小型ロボットは、初期位置（ホームポジション）を図－５の座標系で考えると表－３に示す値となり図－８の形となる。この初期位置から指定された入力

に基づき図－7の制御フローに従って移動する。

3.3 データ解析手法

3.3.1 データ収集

効率算出用のγ線スペクトルデータの測定は、小型ロボットを制御しながら行わなければならない。そのデータ収集のフローを図－9に示す。最初に点線源保持用のアクリル製バスケットを小型ロボットのハンドに固定し、密封点線源をそれに入れ検出器外筒の中心（原点）と小型ロボットの原点（プログラム原点）を一致させる。次にγ線スペクトルデータ収集用プログラム（ROBOT)を起動させることにより密封点線源をあらかじめ設定した点へ移動し、測定を開始する。測定終了後自動的にγ線スペクトルデータを卓上コンピュータへ転送し、生データ(4096ch)のうち着目するγ線のピーク付近のデータのみをフロッピィディスクに書き込む。小型ロボットは、密封点線源を次の点に移動させ、マルチチャンネル波高分析装置の以前のデータを消去して再び測定を開始する。このように自動的に移動→測定→データ保存を繰り返し、γ線スペクトルデータの空間分布を種々の核種のγ線エネルギー毎に測定する。その状況を写真－3に示す。

今回使用した密封点線源は、いずれもフランスLMRI社製であり、その仕様及び解析に使用したγ線エネルギーを表－4に示す。ピーク計数効率測定に適したγ線エネルギーは、50～2000keV の範囲でカスケードγ線を出さない色々なγ線を放出する核種が良いとされている。

本試験では、計算を容易に行うため単色γ線放出線源を使用した。

3.3.2 ピーク計数効率の算出

空間分布γ線スペクトルデータから、各点における空間分布ピーク計数効率を算出(ANAL)。その結果を基に半径方向に数値積分を行い面線源としてのピーク計数効率を算出(PLATE-FIT1)。さらに高さ方向に数値積分を行い容積線源としての効率を算出する。その解析フローを図－10に示す。

(1) 空間分布ピーク計数効率

各エネルギーごとに収集された空間分布γ線スペクトルデータは、卓上コンピュ

ータを使用してそれぞれの位置ごとに空間分布ピーク計数効率を２－３式により求める。算出時には、自動的にそれぞれの密封点線源に対しての減衰補正が行われ、結果はフロッピィディスクに保存される。

⑵ 面線源としてのピーク計数効率

空間分布ピーク計数効率は、それぞれの高さごとに Gauss関数フィッティングを行い関数曲線を計算する。計算結果はプロッタ及びプリンタに出力される。その曲線式を基に半径方向（Xmax）に数値積分を行い面線源としてのピーク計数効率を算出し、プロッタ及びプリンタに結果が出力される。

⑶ 容積線源としてのピーク計数効率

面線源としてのピーク計数効率曲線式を基に高さ方向に数値積分を行い容積線源としてのピーク計数効率を算出する。

4. ロボット手先位置精度

4.1 手先位置精度確認方法

本システムで使用している小型ロボットRM-101は、位置分解能 0.3mmと仕様で述べられているが、実際に密封点線源をつかんでの移動で生じる位置精度が未知のため確認を行った。手先の移動距離は、原点を中心に水平方向が10mm単位で±70mm、垂直方向は、0,5,15,30,50,80mm とし全ポイント数が90点となる。手先の動きは、原点から上へ移動していく「垂直移動(M-MASTER2)」、原点から横へ移動して行く「水平移動(M-MASTER3)」及び原点→ポイント１→原点→ポイント２→原点・・・・と原点からポイントへ移る動作を繰り返す「繰り返し垂直移動(M-MASTER4)」の三つについて行った。腕を左右に振る動作については、本システムでは使用しないため位置精度確認を行わなかった。なお、それぞれの移動方法を図－11～図－12に示す。

4.1.1 垂直移動

垂直移動の位置精度確認は、動作用プログラムを使用して動かし、以下の方法により実施した。

(1) 小型ロボットを水平台（約±１度）の上に置き、ホームポジションから原点に移動させ、小型ロボットの爪（フィンガー）を下向きにし、１目盛 0.5mmの物差しを横向きに取りつける。

(2) トランシット（測量用機器）を一定の場所に固定し、水平を補正する。次にトランシットを覗き、中心に見える物差しの値を基準として使用する。また、水平台からフィンガー先端の高さをノギスで測り、その値を基準とする。

(3) ロボットの手先を移動させ、ポイントごとの移動した距離Ｚをノギスで測定し、ポイントの横ずれＲ'をトランシットで確認する。

垂直移動におけるノギスとトランシットによる位置精度の確認方法を図－13に示す。

4.1.2 水平移動

水平移動の位置精度確認は、動作用プログラムを使用して動かし、以下の方法により実施した。

(1) ロボットを乗せた水平台を垂直な壁面に付け、ホームポジションから原点に移動

させ、フィンガーを下向きにし、1目盛 0.5mmの物差しを縦向きに取りつける。

(2) トランシットを一定の場所に固定し、ロボットのフィンガー部分の高さに合わせてから水平を補正し、トランシットが縦揺れしないように再度固定する。次にトランシットを覗き、中心に見える物差しの値を基準として使用する。また、壁面からフィンガー先端までの距離をノギスで測り、その値を基準とする。

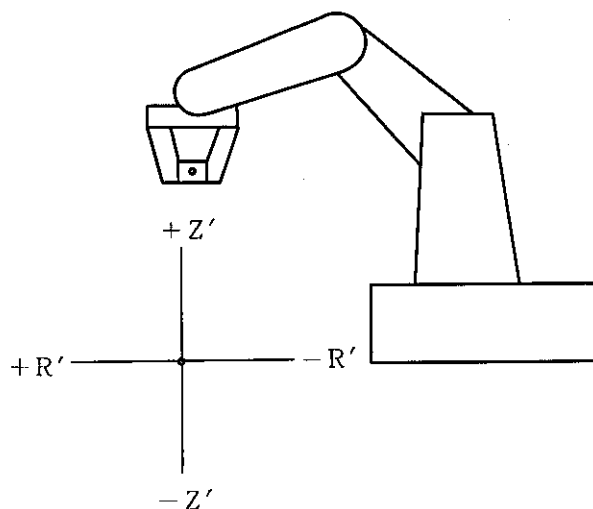
(3) ロボットの手先を移動させ、ポイントごとの移動した距離Rをノギスで測定し、ポイントの上下のずれZ' をトランシットで確認する。

水平移動におけるノギスとトランシットによる位置精度の確認方法を図－14に示す。

4.2 手先位置精度確認結果

4.2.1 垂直及び水平移動の位置精度

垂直移動及び水平移動による手先の移動ポイントに対しての位置精度を図－15①～②に示す。また、それぞれの移動ポイントにおける水平及び垂直方向についてのずれの最大値及び平均値を表－5に示す。

垂直移動と水平移動を比較すると、垂直移動の場合は、移動ポイントを中心に＋R',-R', ＋Z', -Z' 方向いずれも平均したずれが生じている。水平移動の場合は、移動ポイントでの＋R', ＋Z'方向へのずれは無く、-R', -Z' 方向にのみずれる傾向がある。さらに -R'方向へのずれが最大4.3mm,平均でも2.6mm と大きいことが確認された。この結果により、実際の効率データ収集におけるロボットの手先の移動は、垂直移動を主体として行うこととした。

4.2.2 繰り返し垂直移動の位置精度

実際のデータ収集と同じ動きをするM-MASTER4 の位置精度の確認は、垂直移動と同

様の方法で行った。その結果を図－15③～④及び各移動点における精度を図－16に示す。また、移動ポイント及び原点に対するR', Z'方向の位置精度の最大及び平均値を表－6に示す。水平方向移動時の移動ポイントにおける垂直方向の高さ誤差を図－17に示す。

移動ポイントにおけるずれは、垂直移動のみの場合より小さくなっている。原点は、垂直方向へのずれは少ないが、水平方向に対してはマイナス側に集中している。また、移動ポイントにおける垂直方向への誤差は、R-10を中心にして＋R方向では上へ、－R方向では下へずれることが確認された。また、移動ポイントでのずれは、再現性があることを確認した。

4.3 位置精度とピーク計数効率

この移動誤差が、ピーク計数効率に対する影響を確認するため、基本となる点線源ピーク効率曲線の水平方向（半径方向）に対する移動誤差をAm-241, Cs-137, Co-60(1.3MeV) に対して補正を行った。その結果を図－18に示す。密封点線源の高さは、2㎝であるが、上記3種類のエネルギーに対して本実験に使用したロボットの位置精度は、それぞれのピーク計数効率に対して大きな影響を及ぼさないことが確認できた。

5. 効 率 測 定 結 果

5.1 ピーク計数効率空間分布

密封点線源の高さH＝10,20,30,45,60,80mm の各位置において半径方向R＝－70～0～＋70mmの範囲で10mmごとに空間分布γ線スペクトルを測定し、前述の方法により点(R,H) におけるピーク計数効率の空間分布を求めた。空間分布ピーク計数効率は、図－19に示すようにGauss 関数によくフィッティングする。図－19は、Am-241,59.5keVのエネルギーに対するものである。

測定原理によれば、半径方向のみの測定でよいとしているが、実験では、直径方向まで測定を行った。図に示す Gauss関数曲線の頂点が＋側に約１mm程度ずれている。これは、検出器外筒の中心とゲルマニウム検出器有感部分の中心がずれているためと思われる。理想的には、検出器自体の中心を求め、そこを原点とすることが望ましい。

高さごとの Gauss関数曲線は、次の式で表した。

$$Y = C_1 + C_2 \exp\left[-C_3(R - C_4)^2\right] \qquad (5\text{-}1)$$

５－１式をもとに、半径 3.25cm の面積線源とするため数値積分を行った。面線源の半径3.25cmとしての数値積分は、ピーク計数効率比較用容積線源の半径と同一とするためである。なお、この半径は、任意の値にすることが可能である。その結果を図－21①～⑭に示す。図に示すようにそれぞれのγ線エネルギーに対してηとHとの関係は、関数に置き換えることができる。これにより、容積線源の大きさを容易に可変することができる。

$$Y(\eta) = A_1 \exp(-A_2 X) \qquad (5\text{-}2)$$

5.2 自己吸収補正

標準容積線源による効率は、測定試料を模擬した母材を用いた場合、幾何学的形状を測定試料と同一にする必要があり、作製する個数も多くなる。また、効率は、自己吸収を含んだ値しか求めることができない。しかし、この方法では自己吸収を含んだ効率と含まない効率とを求めることができる。

この方法を用いて自己吸収を補正する場合は、効率算出用のγ線スペクトルを測定す

る際に、厚さ（h）の吸収物質を密封点線源と検出器の間において行った。今回使用した吸収物質は、アルミニウム板（厚さ5mm）、アクリル板（厚さ5mm）を任意の厚さに設置し密封点線源と吸収板との空間は一定とした。また、モレキュラシーブスを高さ1及び2cmのプラスチック容器に入れて吸収物質とした。その方法を図－22及び写真－4に示す。3種類の吸収板は、Ge(Li)検出器の直径を大きく上まわり、点線源の移動距離を充分満たす長さを有している。 それぞれの吸収板に対するAm-241,59.5keVにおけるGauss関数とのフィッティングを図－23～25に示す。アルミニウム板は、10,20,30,40mm、アクリル板は、10,20 mmの厚さにし、密度は、図－22の式によりアルミニウム＝1.53 g/cm³、アクリル＝0.72 g/cm³、モレキュラシーブス＝0.40 g/cm³である。3種類の吸収板はそれぞれがマイナス側に Gauss関数曲線の頂点がずれているが、これは、Ge(Li)検出器の中心と小型ロボットの移動原点（密封点線源の中心）がずれたためと思われる。この結果を基に面線源への変換を行い、面線源としての高さに対する効率曲線を図－26～28に示す。この場合の面線源の半径は、3.25cmである。

5.3 容積線源への変換

5.1 及び5.2 で得られた面積線源としてのピーク計数効率は、x＝0.4 からx＝hまで積分して容積線源としての効率 ε_vを求める。なお、積分範囲を0.4 からとしたのは、容器底部を容積線源範囲より除くためである。

$$\varepsilon_v = \frac{1}{h}\int_{0.4}^{h} A_1 \exp(-A_2 h)\, dx \qquad (5\text{-}3)$$

5-3 式を用いて、空気（ρ＝ 1.205 mg/cm³）、アルミニウム（ρ＝ 1.53 g/cm³）、アクリル（ρ＝ 0.72 g/cm³）、モレキュラシーブス（ρ＝ 0.40 g/cm³）を吸収体とした模擬容積線源としてのピーク計数効率の算出結果を図－29～32に示す。また、比較用体積線源（ρ＝ 0.72, 0.40 g/cm³）のピーク計数効率曲線を図－33～34に示す。

アクリル及びモレキュラシーブスを吸収体として使用し、容積線源に模擬した結果と比較用容積線源のピーク計数効率を比較すると表－7のとおりである。模擬容積線源は、比較用容積線源より、全体的に1.47倍（平均値）高いという結果が得られた。

6. 考　　察

小型ロボットと密封点線源を使用してGe(Li)検出器を校正する試みを実験したが、各種測定結果から小型ロボットの位置精度誤差をどのようにプログラムで補い、自己吸収補正用吸収体を使用しないで任意の試料密度に対するピーク効率の補正を行う等、多くの問題点が上げられる。これらは、今後のロボット技術の向上等により逐次改善出来るものと期待する。

7. 参 考 文 献

1) 本多哲太郎、武田健治、野口正安：RADIOISOTOPES, Vol27 p.367 (1978)

2) 野口正安：「実験と演習　γ線スペクトロメトリー」，日刊工業新聞社 (1980)

3) 野口正安：RADIOISOTOPES, Vol28 p.658 (1979)

4) 三菱電機教育用ホビー用マイクロロボットムーブマスターRM-101取扱説明書(1982)

5) 小型ロボット制御プログラム理論説明書，芙蓉情報センター(1985)

6) 小型ロボット制御プログラムｲﾝﾀｰﾌｪｲｽﾕｰｻﾞｰｽﾞﾏﾆｭｱﾙ，芙蓉情報センター(1985)

7) 古田定昭：Ge(Li)検出器を使用した環境試料γ線核種分析 PNC N941 84-71 (1984)

表目次

表－1　小型ロボット仕様

項目		仕様
型式		RM-101
用途		教育用・ホビー用
構造		関節形・鋼板構造
動作自由度		5
動作範囲	胴体旋回	240°（左右120°）
	肩回転	150°（後方75°）（前方75°）
	肘回転	120°（後方45°）（前方75°）
	手首曲げ	180°
	手首ねじり	360°
形ハンドの爪の間隔		最大80mm
可搬重量		500g（ハンドの重量含まず）
最大速度		ハンド先端で7cm／秒

項目		仕様
位置精度分解能		0.3mm
駆動制御部	駆動モータ	ステッピングモータ 6個
	速度制御	台形波制御
	各軸制御	6軸同時複合動作可能
	インターフェース	セントロニクス準拠
	プログラム言語	ロボット言語「M-ROLY」またはBASIC Assembly、その他
	所要電源	AC100V 単相50/60Hz 60Wコード2m付
重量		約10kg

表－2　小型ロボットリンクパラメータ

リンク	関節変数	α	a	b	cosα	sinα
1	θ_1	90°	0	0	0	1
2	θ_2	0°	a_2	0	1	0
3	θ_3	0°	a_3	0	1	0
4	θ_4	-90°	a_4	0	0	-1
5	θ_5	90°	0	0	0	1
6	θ_6	0°	0	0	1	0

表－3　小型ロボットホームポジション値

	1	2	3	4	5	6
a (mm)	214	200	150	100	0	0
θ (度)	0	45	－45	0	90	－90

表－4　密封点線源の仕様とγ線エネルギー

Radionuclide	Half life	Activity (Bq)	Energy (keV)	Emission (%)
Am-241	432.6y	4.668×10^{4}	59.537	35.9
Cd-109	462.6d	4.375×10^{4}	88.034	3.65
Ce-139	137.64d	3.111×10^{4}	165.857	79.9
Co-57	271.77d	3.906×10^{4}	122.0614 136.4743	85.68 10.67
Cs-137	30.15y	3.357×10^{4}	661.660	84.7
Hg-203	46.585d	4.190×10^{4}	279.1967	81.6
Mn-54	312.2d	4.564×10^{4}	834.843	99.976
Sn-113	115.06d	2.779×10^{4}	391.702	64.89
Sr-85	64.85d	5.521×10^{4}	514.009	99.29
Zn-65	243.9d	2.887×10^{4}	1115.546	50.75
Co-60	5.271y	5.704×10^{4}	1173.208 1332.464	99.86 99.98
Y-88	106.62d	4.619×10^{4}	898.021 1836.014	94.00 99.36

NOTE:

Reference time: ^{241}Am、^{109}Cd、^{139}Ce、^{57}Co、^{137}Cs、^{203}Hg、^{54}Mn、^{113}Sn、^{85}Sr、^{65}Zn } 25.01.1985 at 12:00

^{60}Co= 03.01.1985 at 12:00

^{88}Y = 08.01.1985 at 12:00

表－5　垂直移動及び水平移動における位置精度

（単位：mm）

	+R′ 最大	+R′ 平均	-R′ 最大	-R′ 平均	+Z′ 最大	+Z′ 平均	-Z′ 最大	-Z′ 平均
垂直移動	2.5	0.41	2.6	0.71	0.7	0.32	1.5	0.58
水平移動	0	0	4.3	2.62	0	0	1.7	0.62

表－6　繰り返し垂直移動における位置精度

（単位：mm）

	+R′ 最大	+R′ 平均	-R′ 最大	-R′ 平均	+Z′ 最大	+Z′ 平均	-Z′ 最大	-Z′ 平均
垂直ﾎﾟｲﾝﾄ	0.5	0.29	2.3	1.34	0.7	0.32	1.5	0.58
原　　点	0	0	3.0	1.49	0.4	0.15	0.2	0.06

表－７　容積線源と模擬容積線源のピーク計数効率（モレキュラシーブス）

（ρ ＝0.40）

高さ (cm)	エネルギー(keV)	88.3	122.1	136.5	165.8	320.0	514.0	661.6	834.8	898.0	1332.5	1836.1
1	容積線源	0.054	0.070	0.070	0.065	0.036	0.023	0.018	0.0145	0.0135	0.0094	0.0069
	模擬線源	0.088	0.108	0.105	0.091	0.048	0.031	0.025	0.020	0.0185	0.013	0.0095
	効率比	1.63	1.54	1.50	1.40	1.33	1.35	1.39	1.38	1.37	1.38	1.38
2	容積線源	0.044	0.056	0.058	0.054	0.031	0.0195	0.015	0.0122	0.0113	0.0079	0.0058
	模擬線源	0.078	0.096	0.090	0.079	0.042	0.0275	0.0218	0.0175	0.0162	0.0113	0.0082
	効率比	1.77	1.71	1.55	1.46	1.35	1.41	1.45	1.43	1.43	1.43	1.41
3	容積線源	0.037	0.047	0.048	0.045	0.0255	0.016	0.013	0.0105	0.0098	0.0067	0.0050
	模擬線源	0.066	0.082	0.078	0.068	0.037	0.0235	0.0188	0.0152	0.0113	0.0078	0.0071
	効率比	1.78	1.74	1.63	1.51	1.45	1.47	1.45	1.45	1.15	1.16	1.43

注）効率比＝模擬線源／容積線源

図 目 次

図－1　Ge検出器と試料のジオメトリー

図－2　効率測定手法概要図

PNC 19410 87-026

図－3　効率測定システム構成図

図－4　小型ロボット外観図

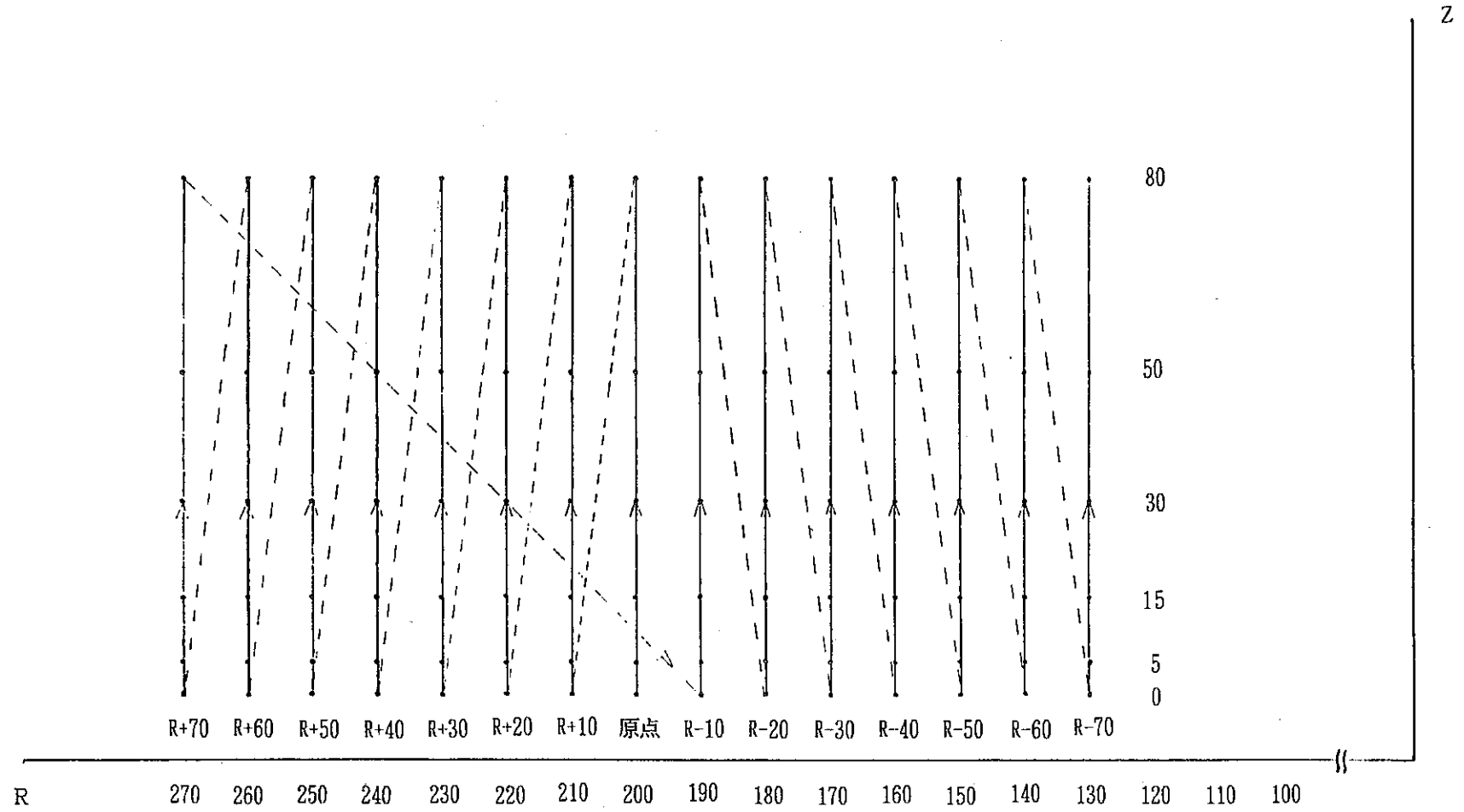
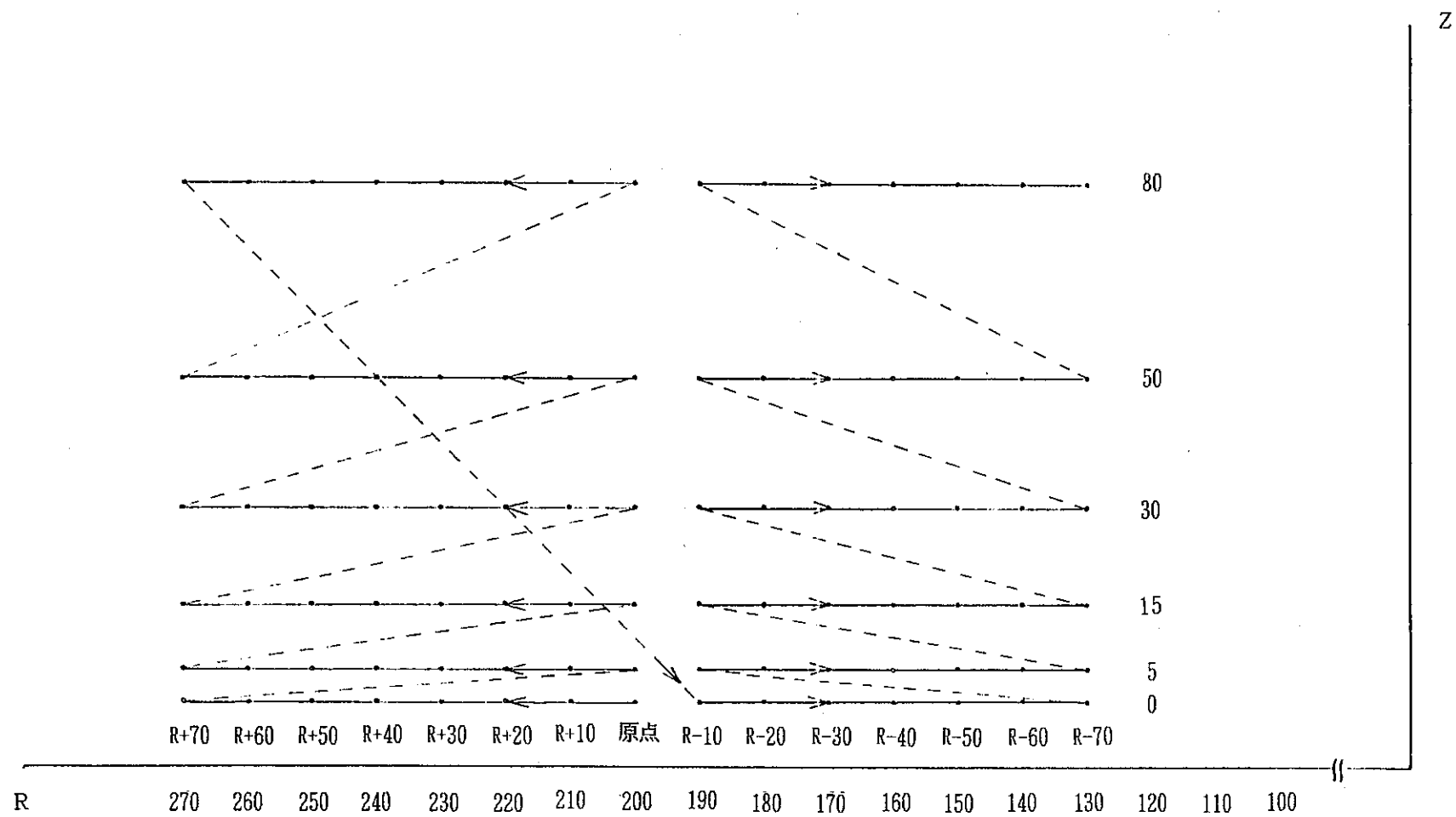
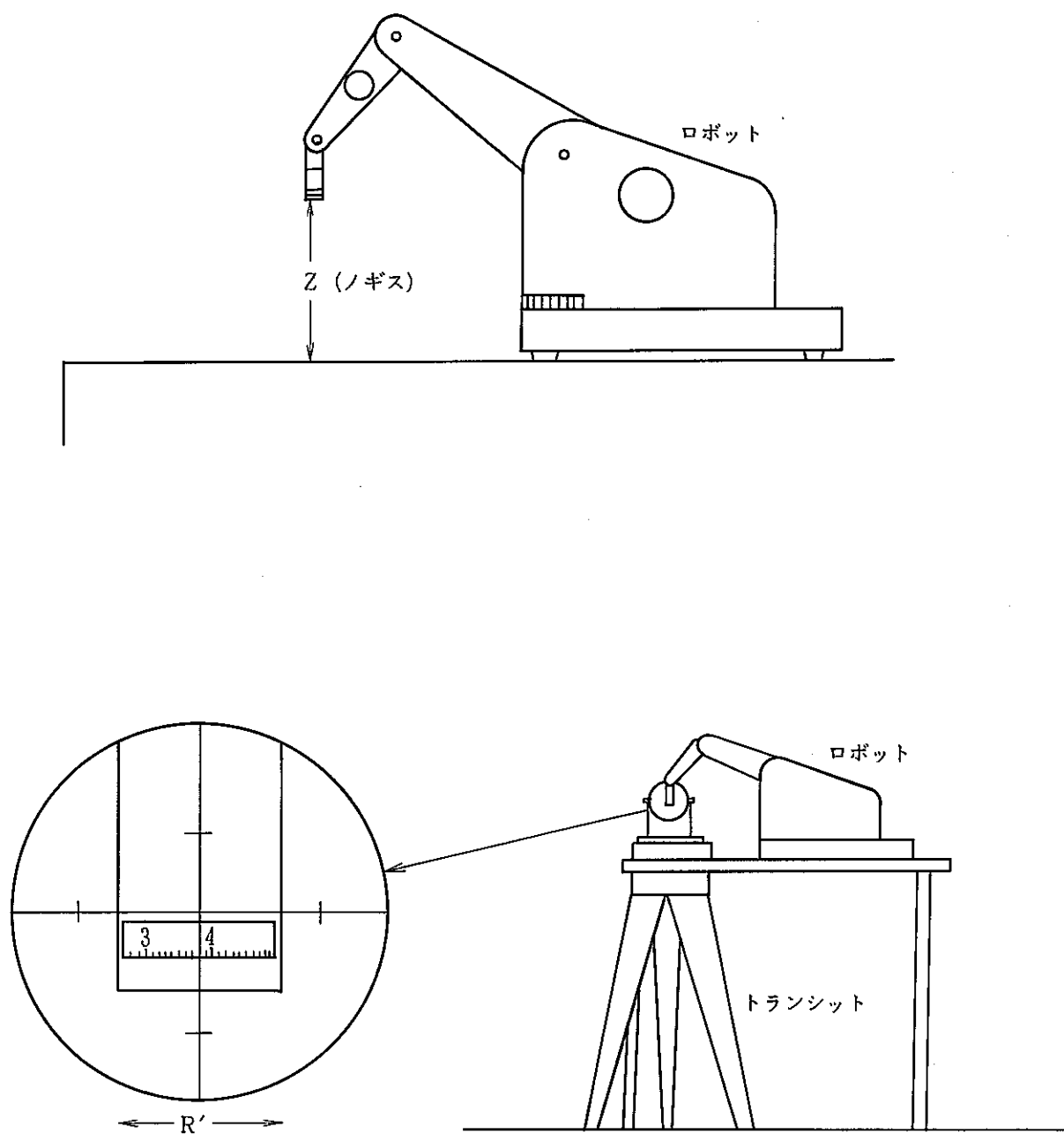
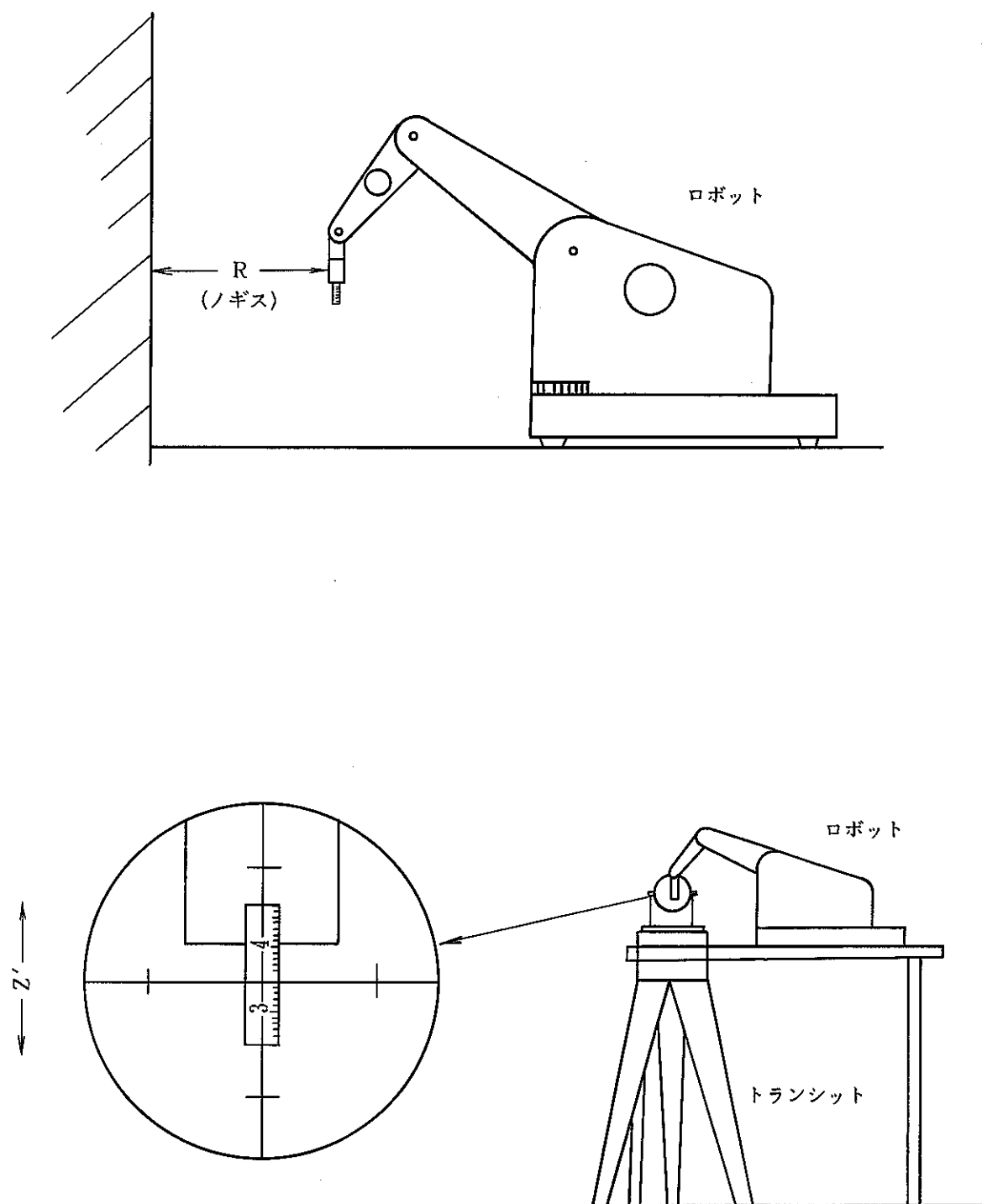
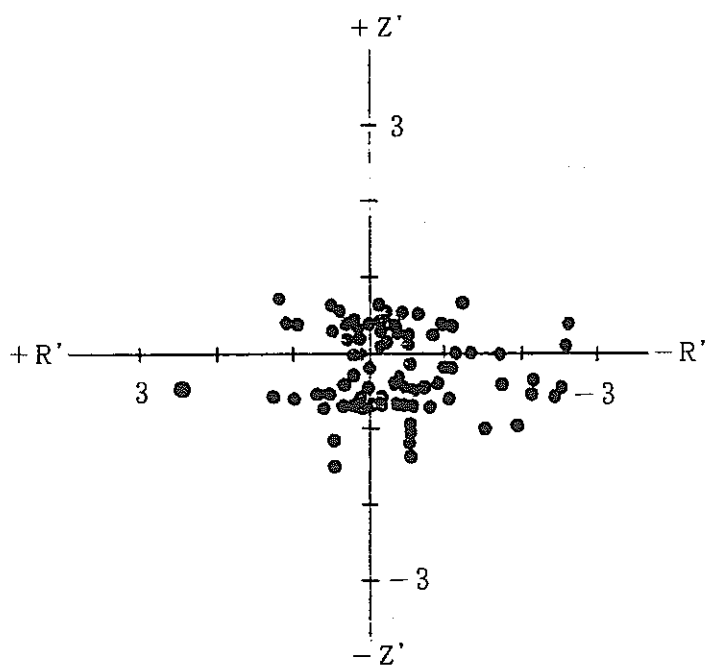
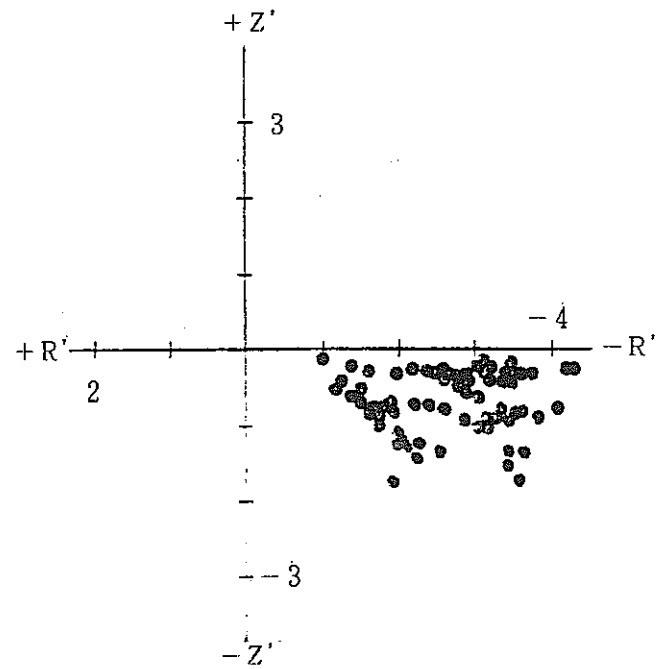
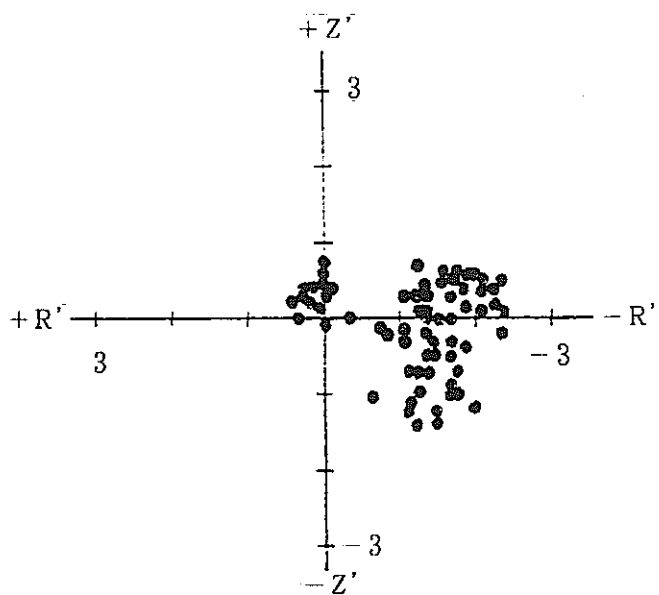
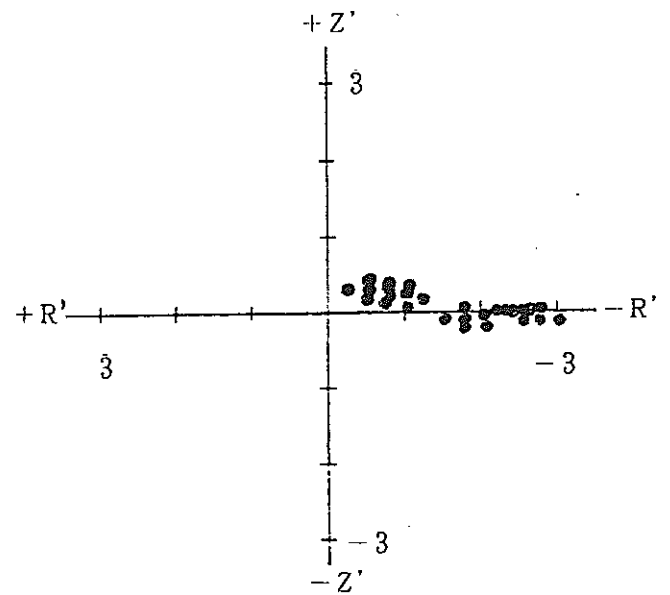
図－5　小型ロボット関節座標系

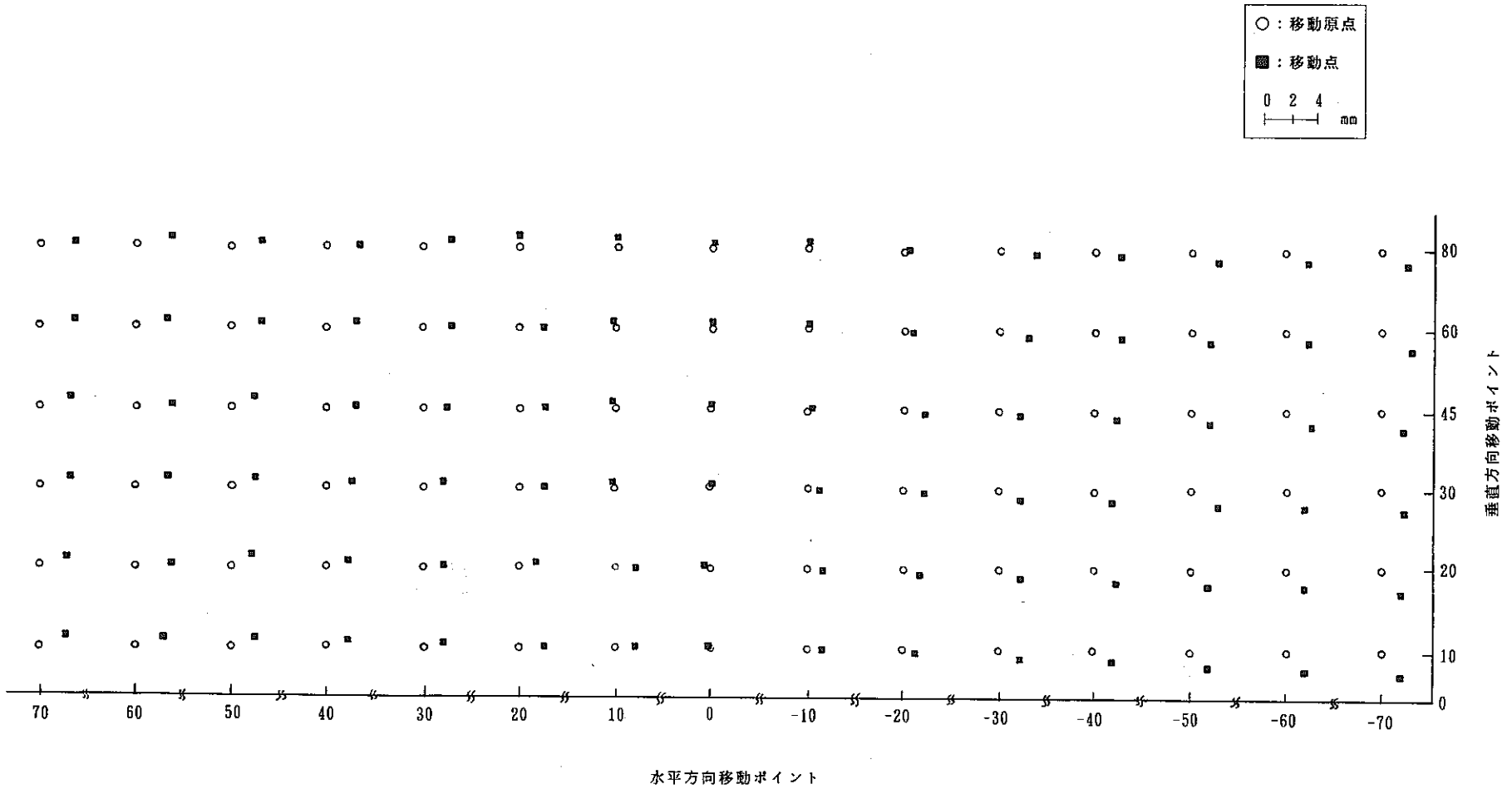
図－6　マニュプレータのロール，ピッチ，ヨー座標系

図－7　小型ロボット制御フロー

図－８　小型ロボットRM-101初期位置

図－9 γ線スペクトルデータ収集フロー

図－10　データ解析フロー

図－11　垂直移動方法（M-MASTER2）

図－12　水平移動方法 (M-MASTER3)

図－13　垂直移動確認方法

図－14　水平移動確認方法

① M-MASTER2 （垂直移動）

② M-MASTER3 （水平移動）

③ M-MASTER4 （移動ポイント）

④ M-MASTER4 （原点）

図−15 小型ロボット手先位置精度

図−16 繰り返し垂直移動ポイント位置精度

図−16 繰り返し垂直移動ポイント位置精度

mm

2

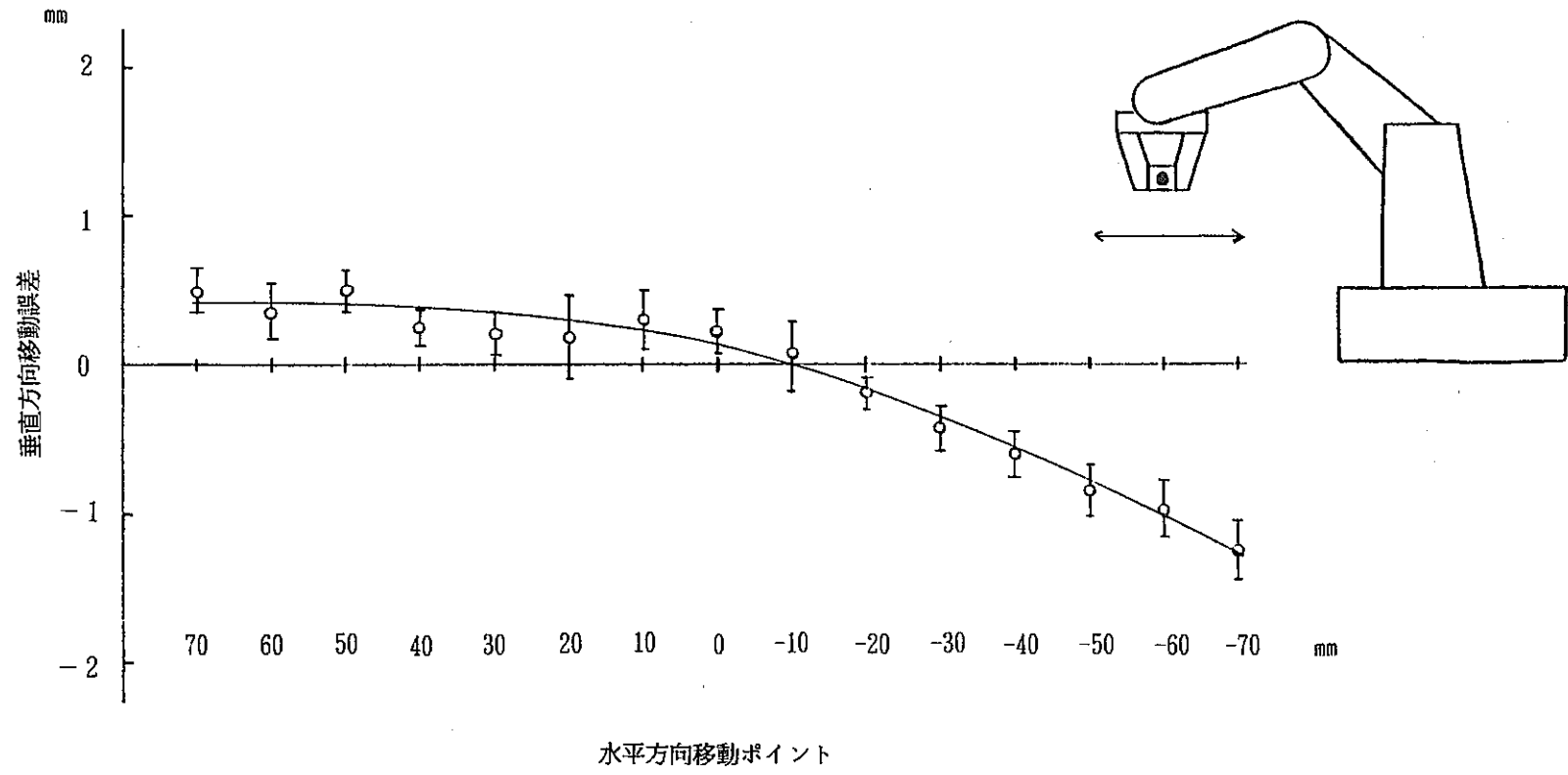
1

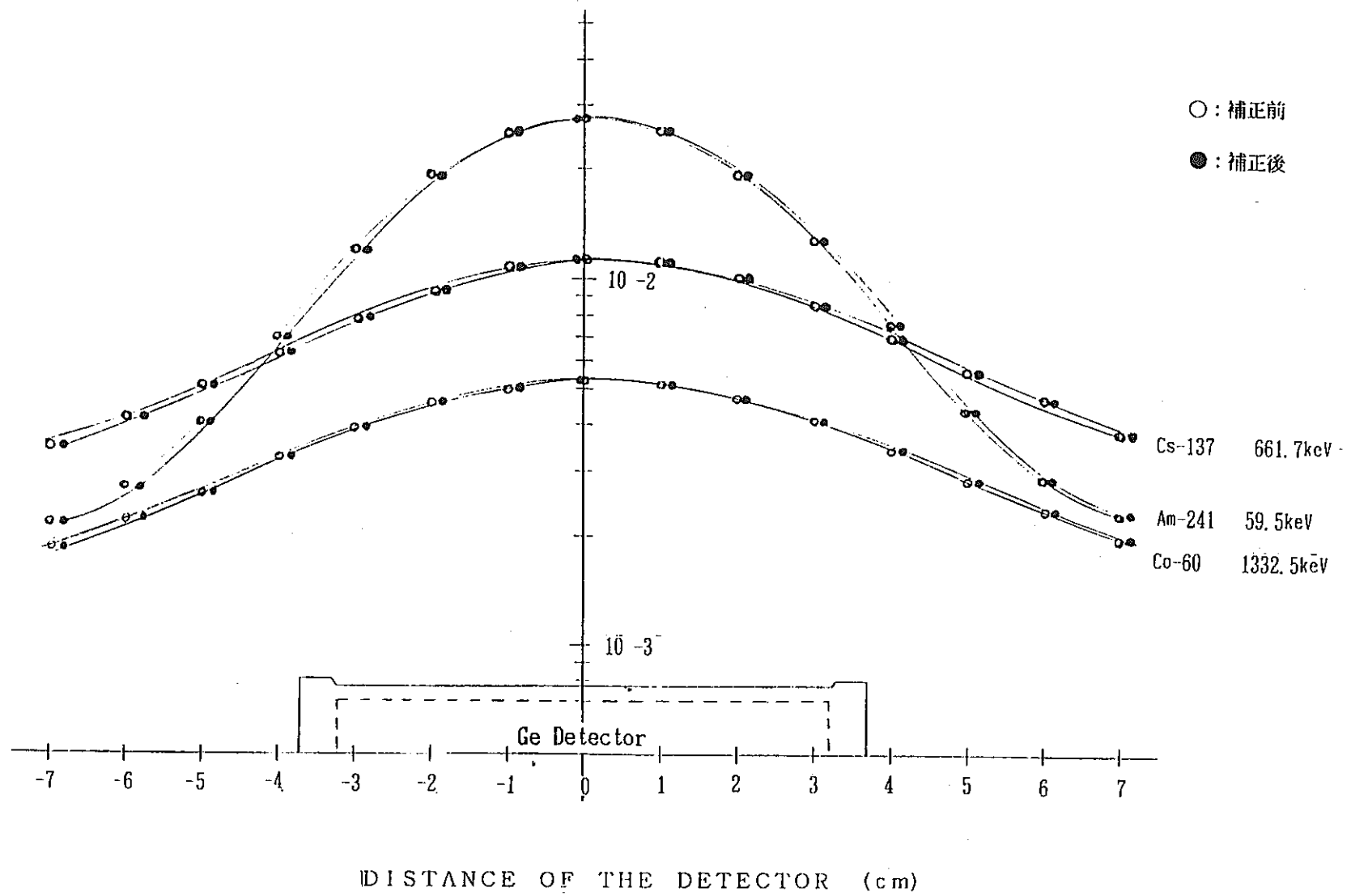
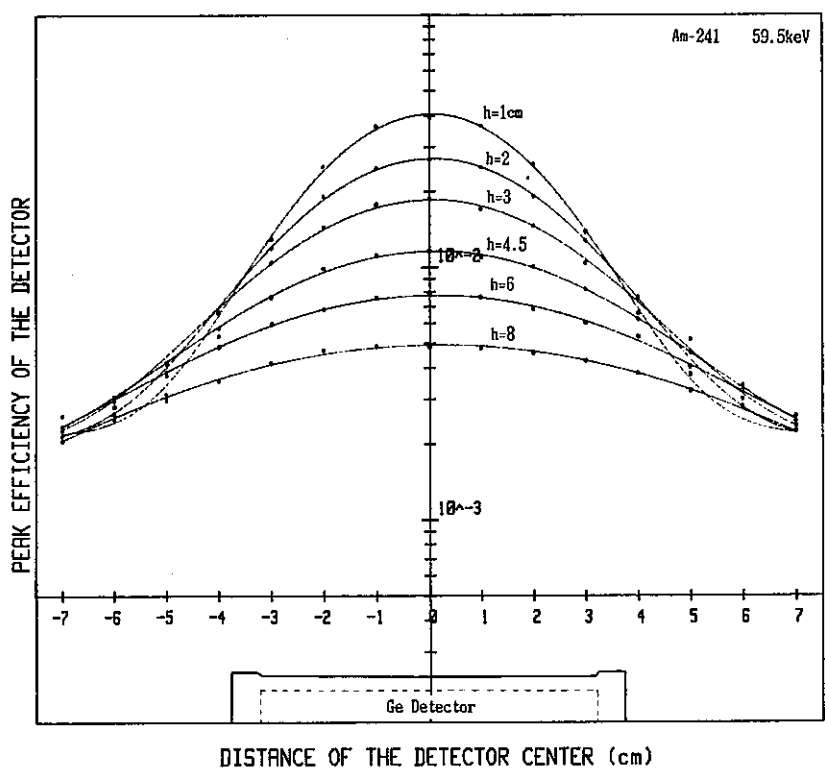
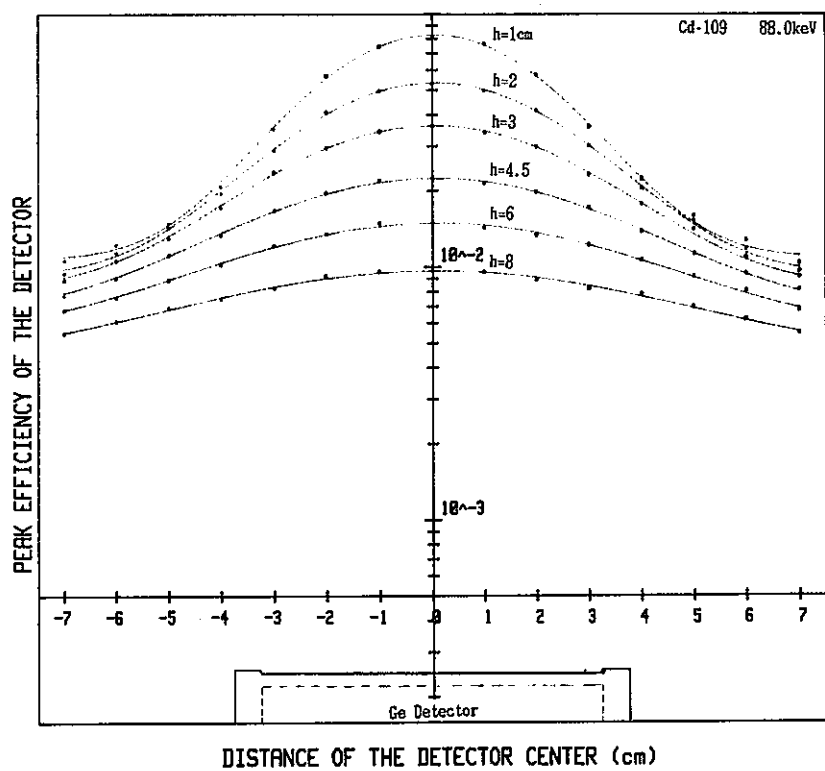
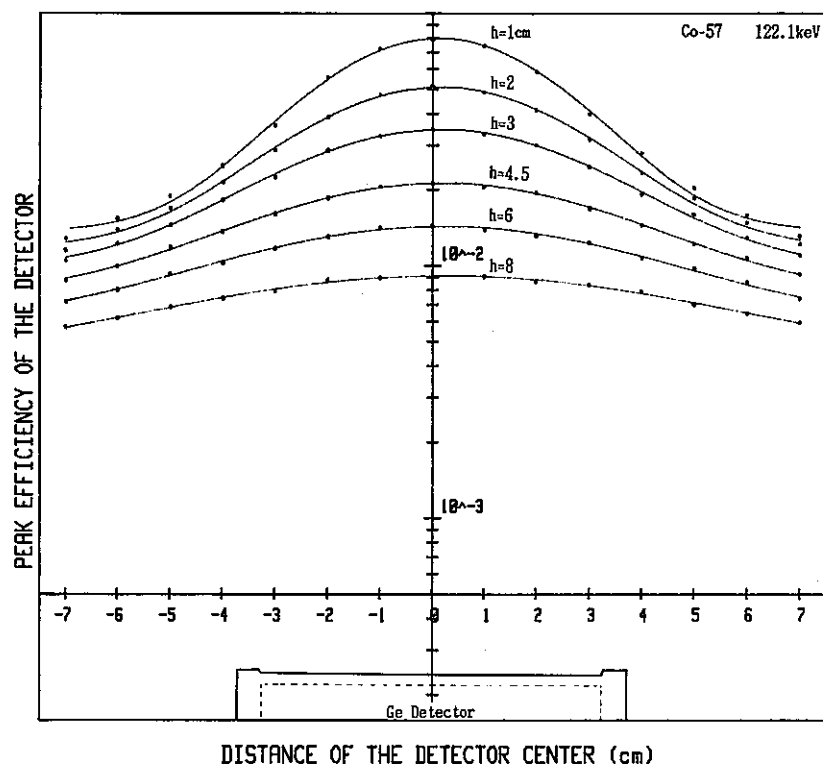
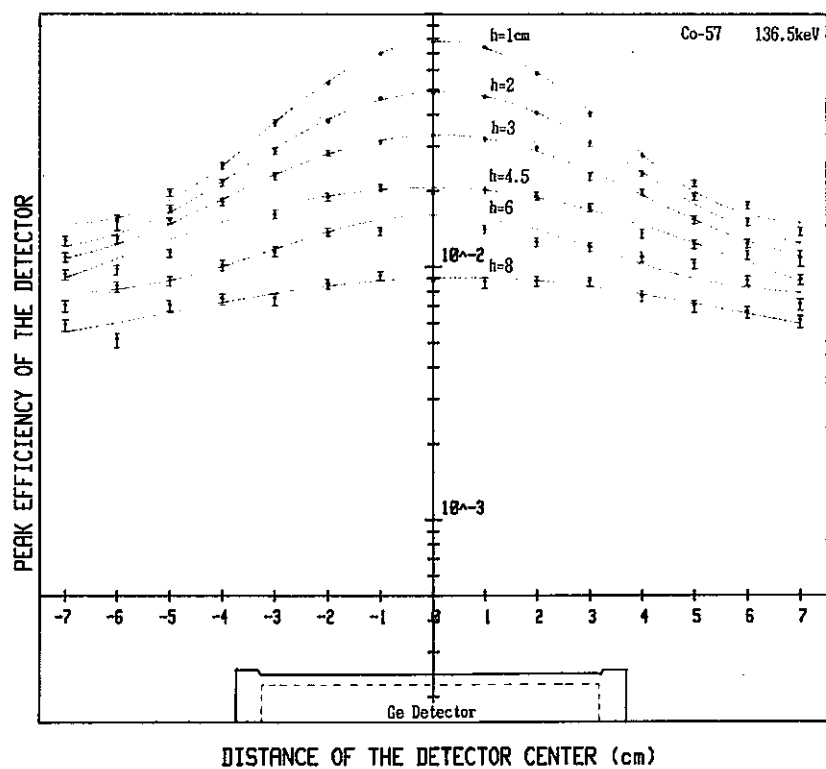
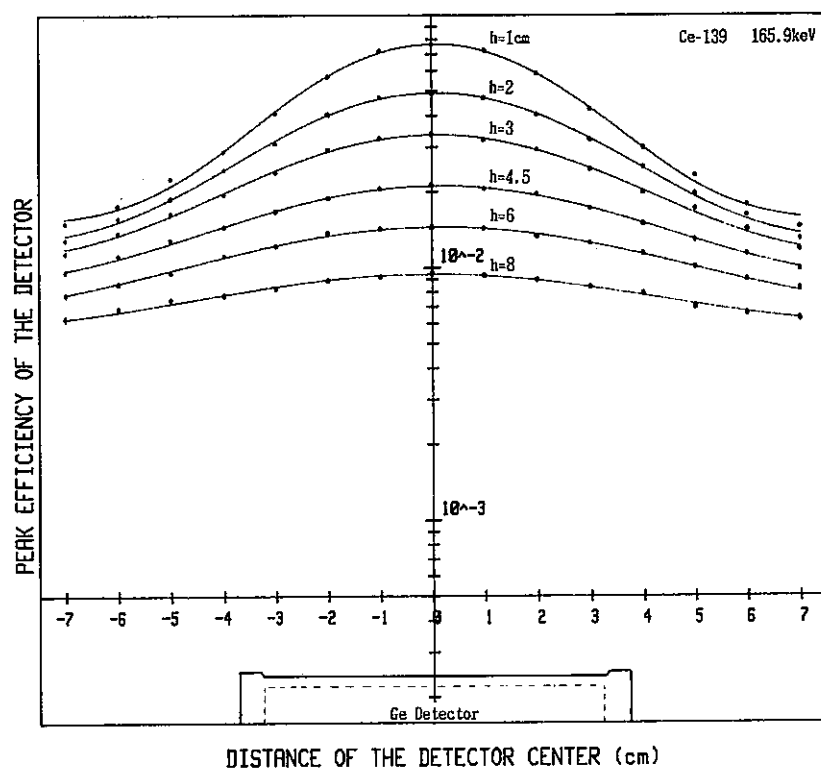
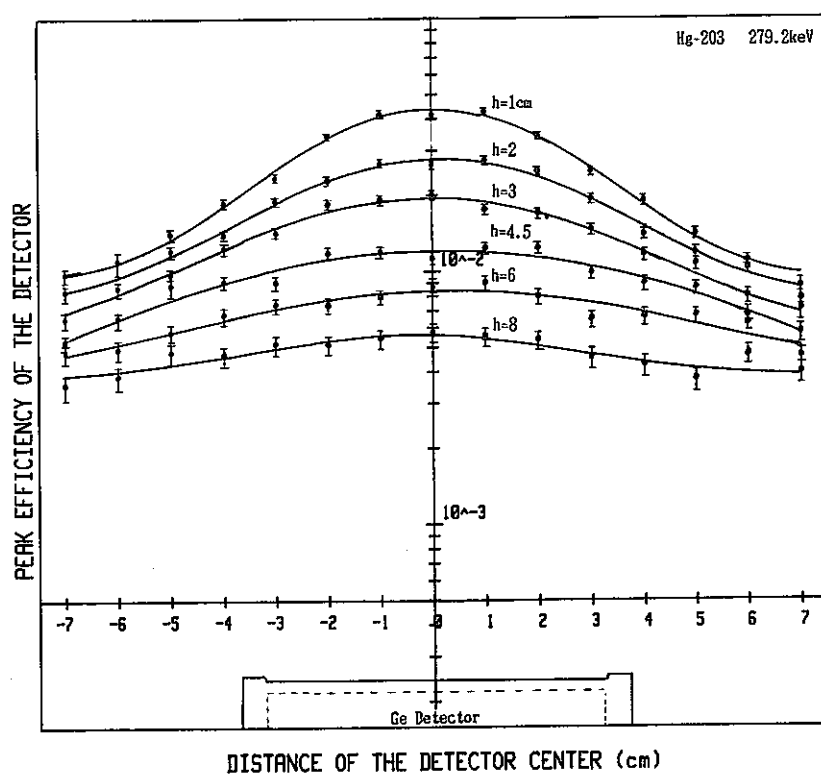
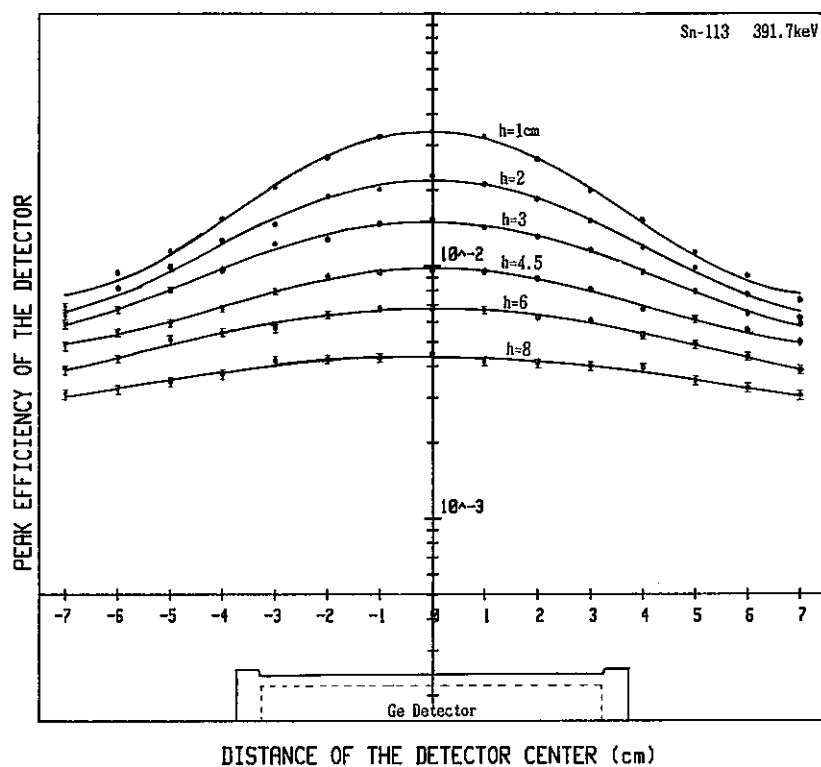
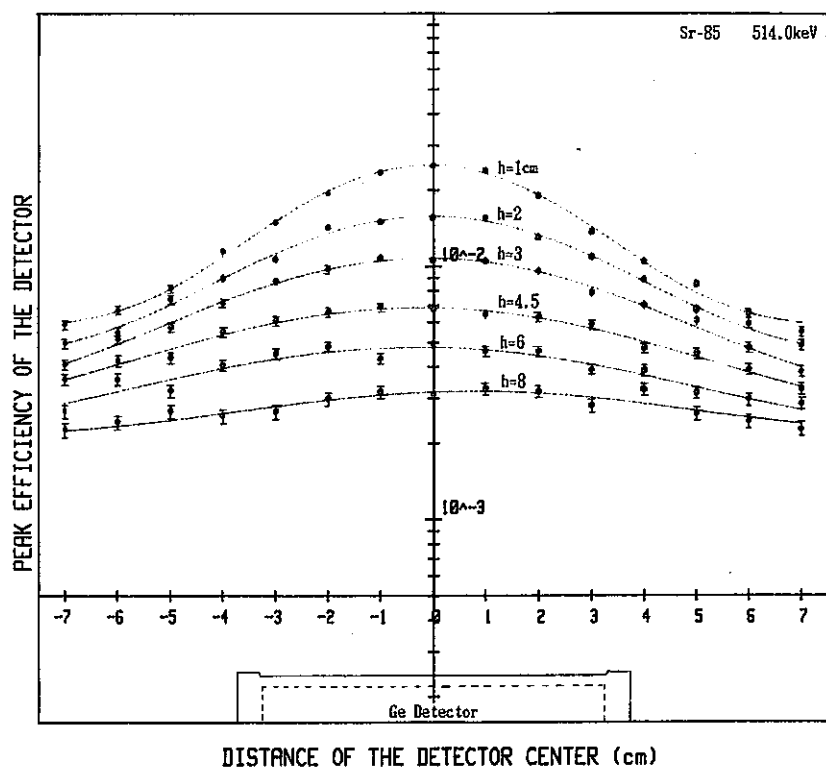
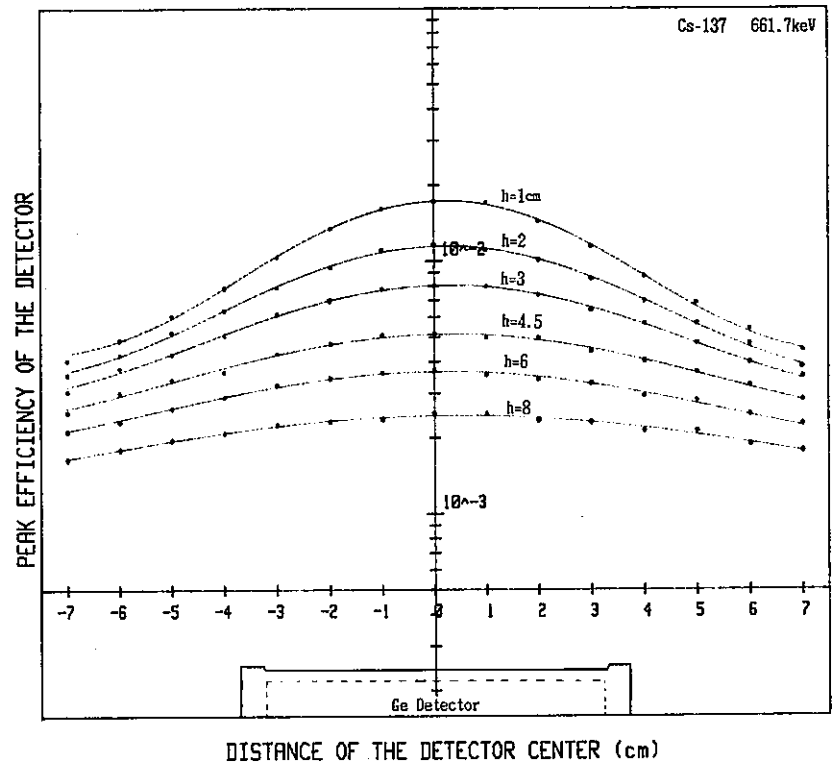
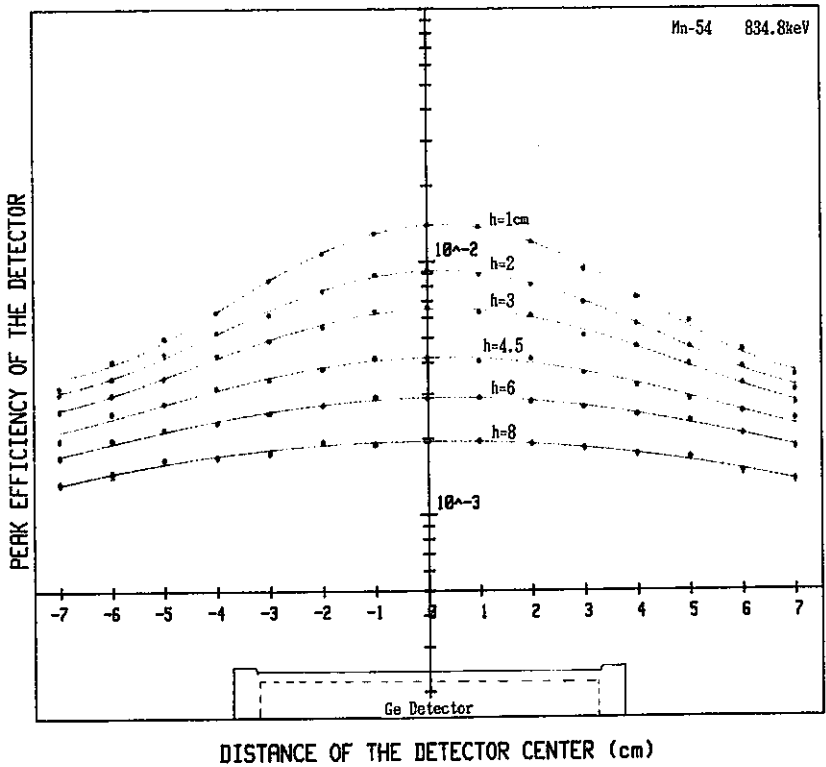
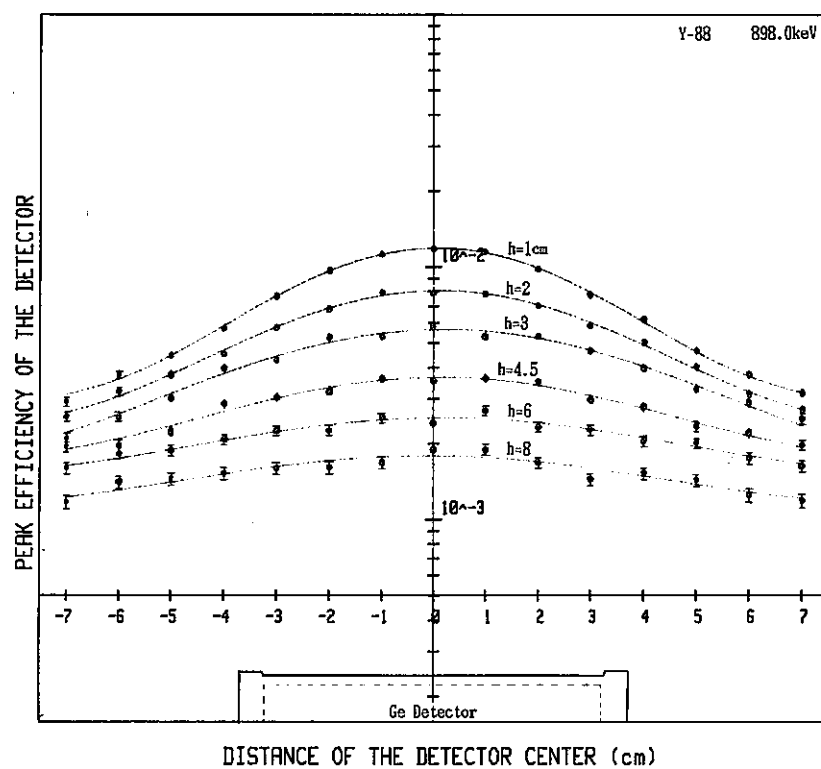
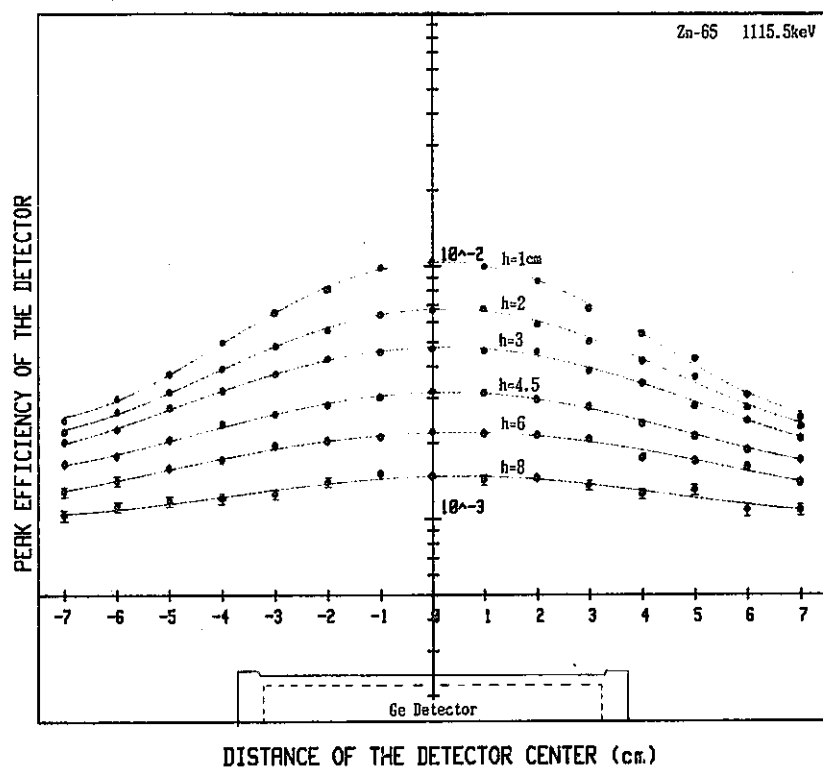
0

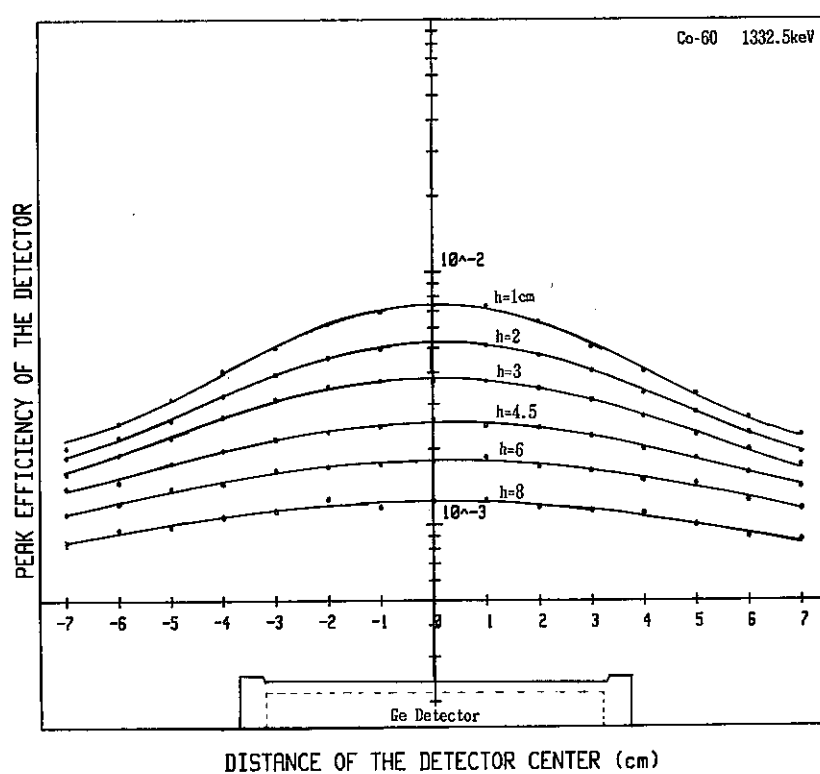
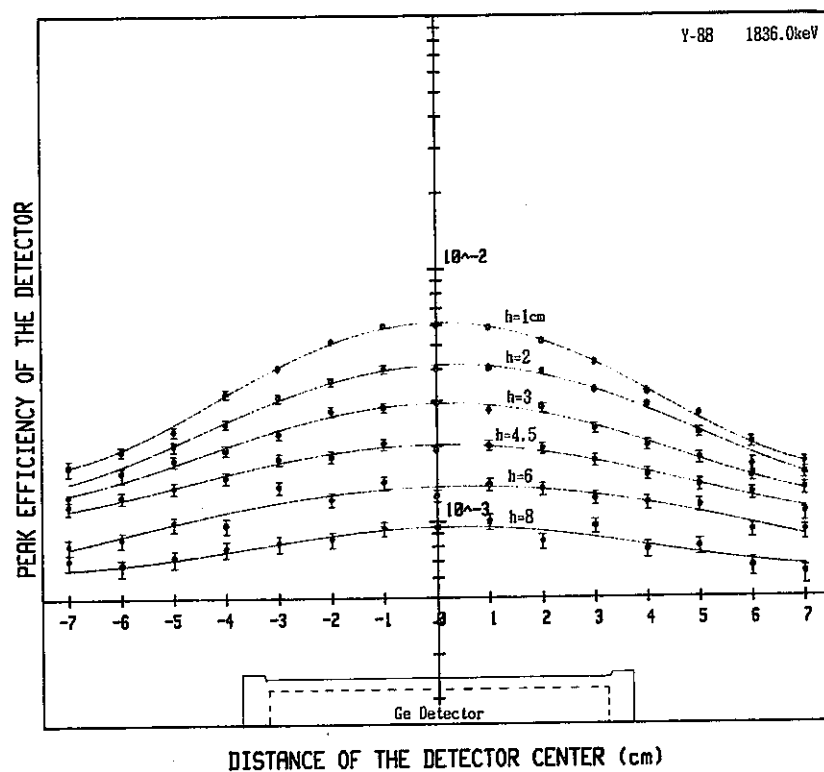
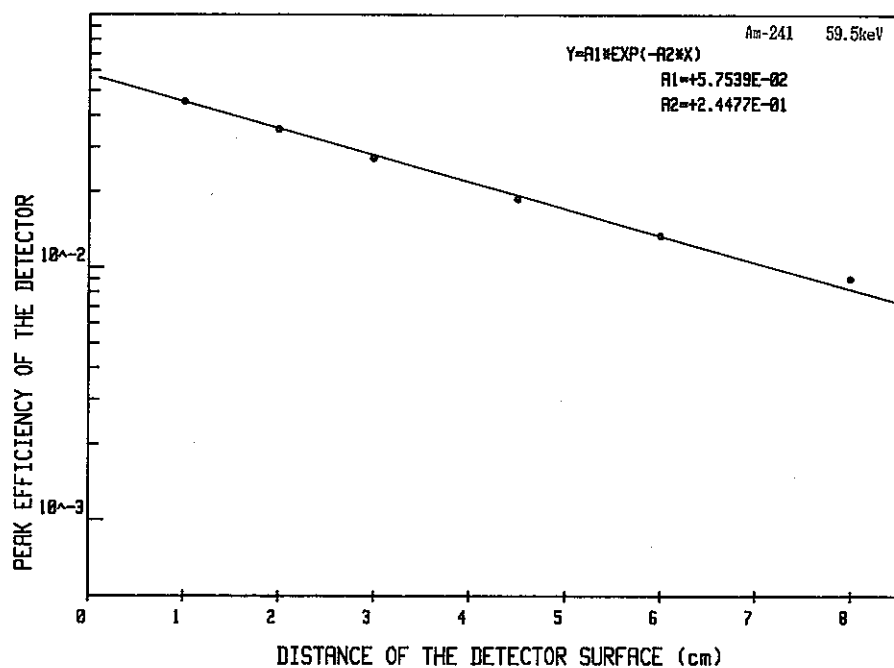
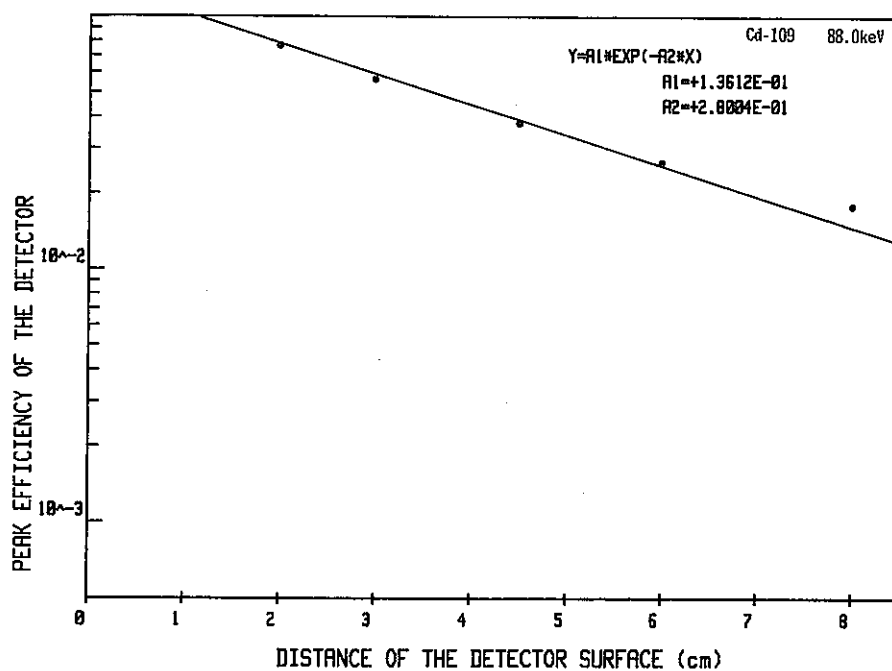
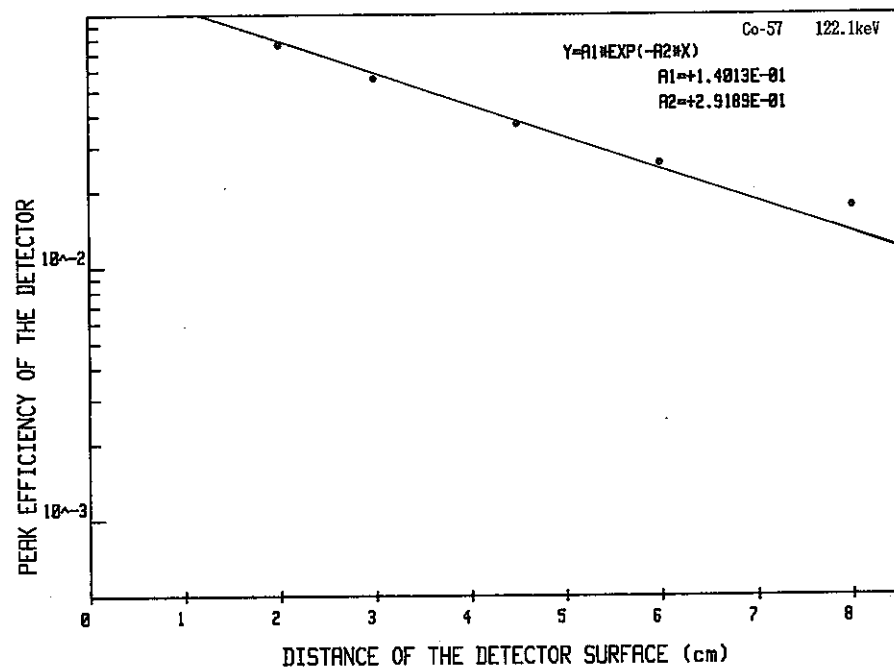
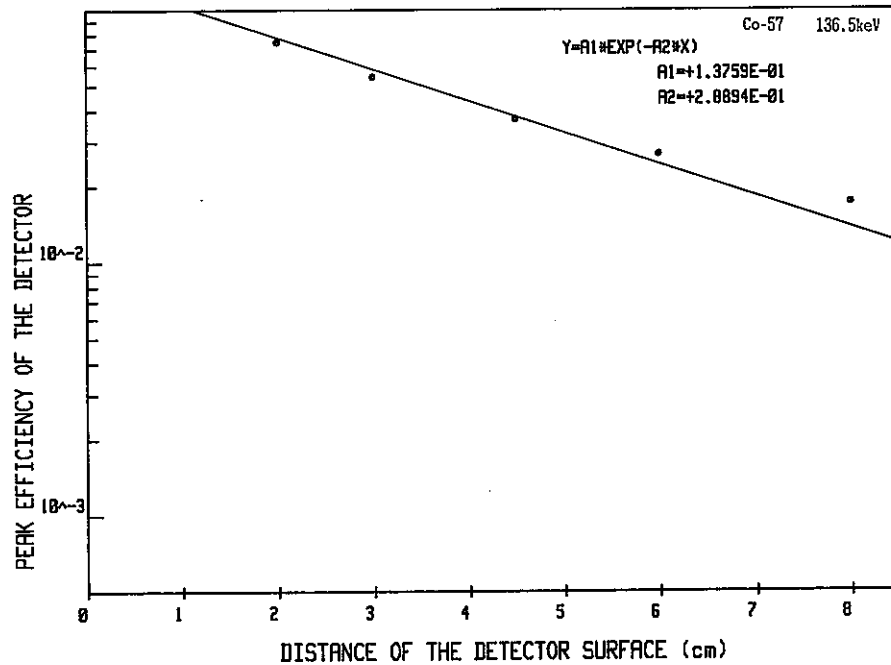
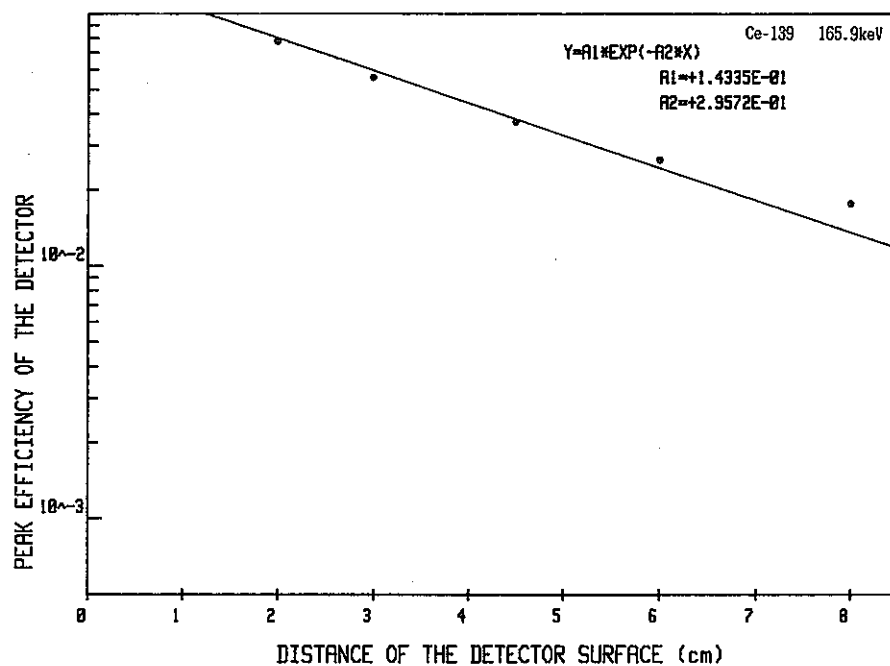
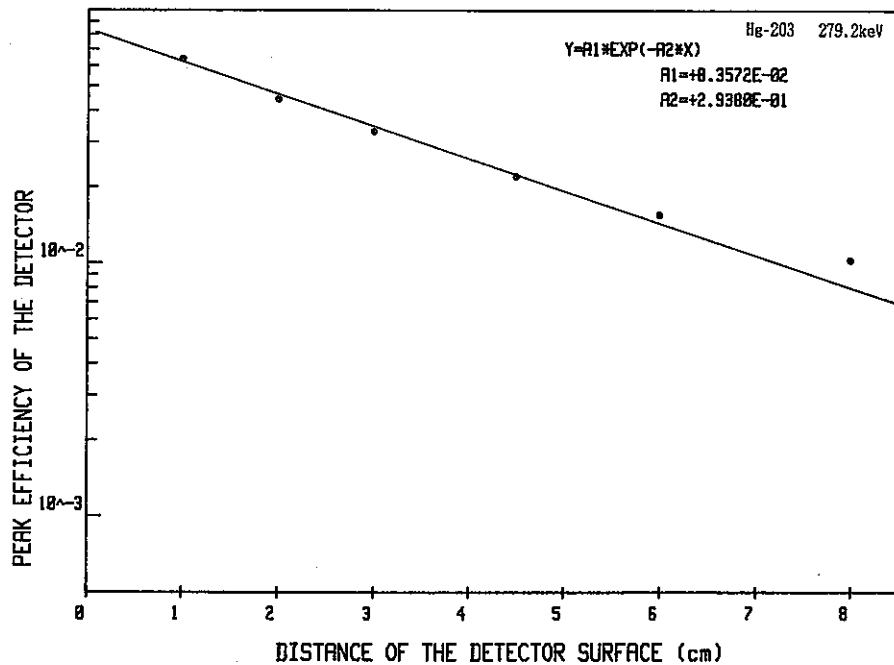
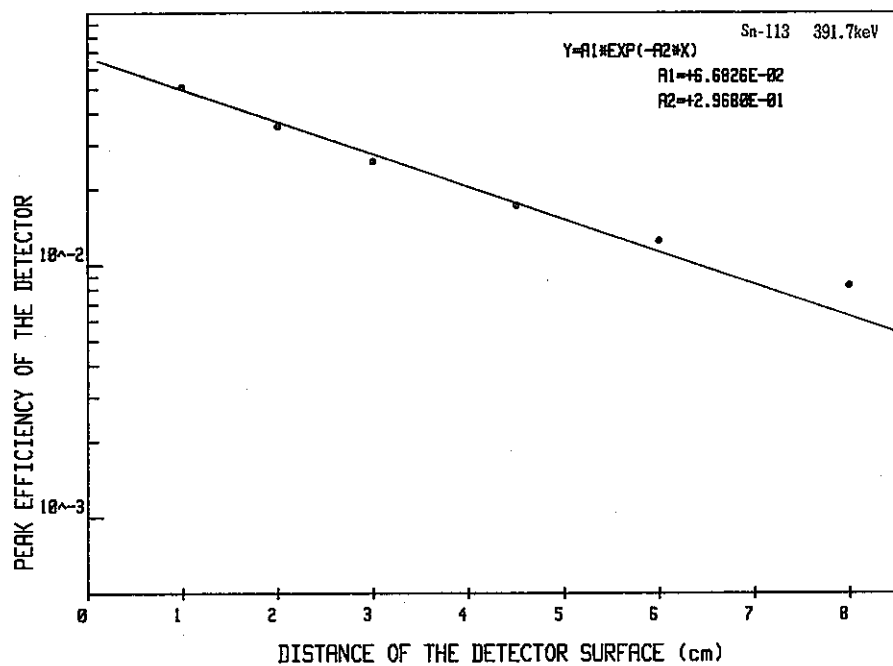
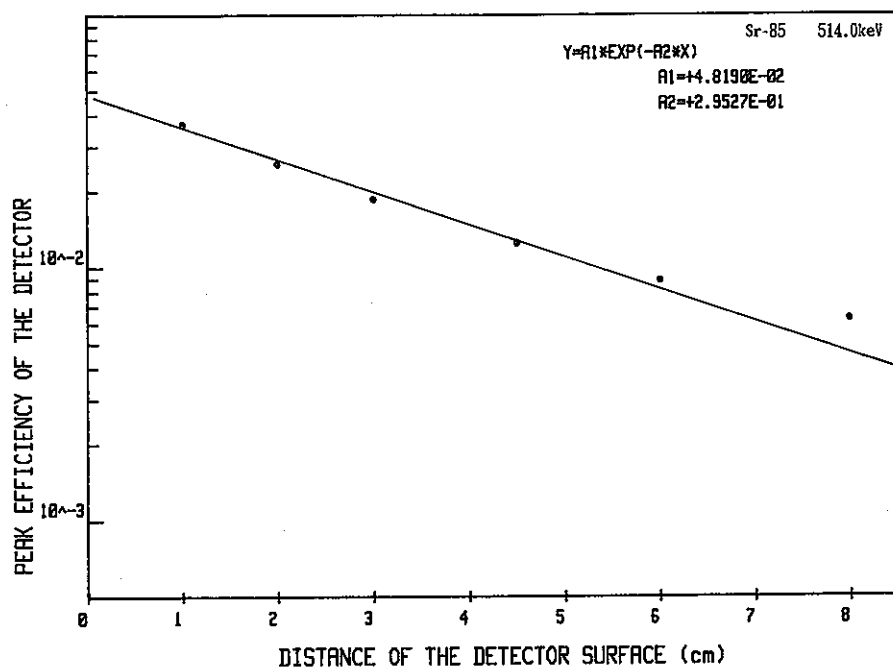
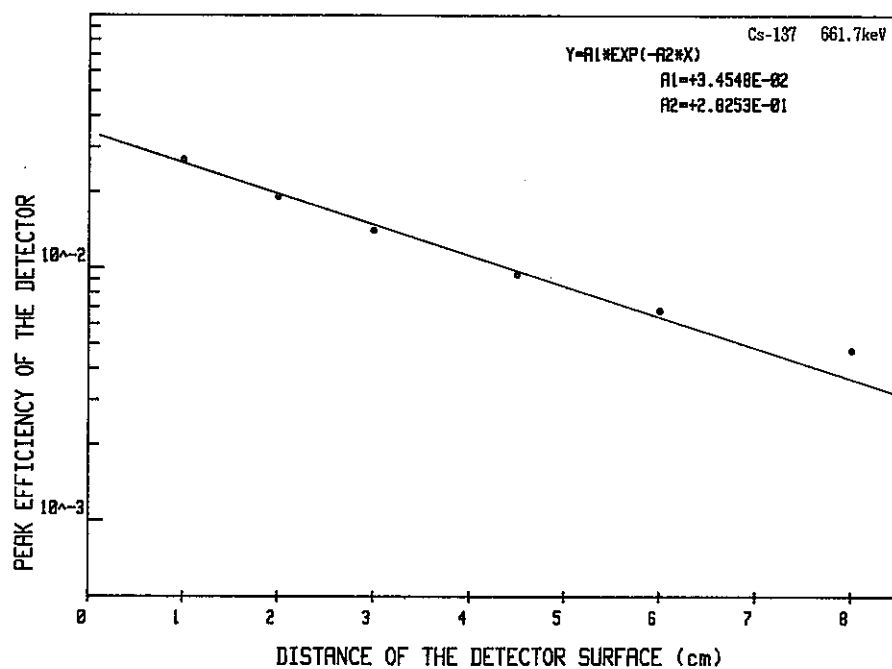
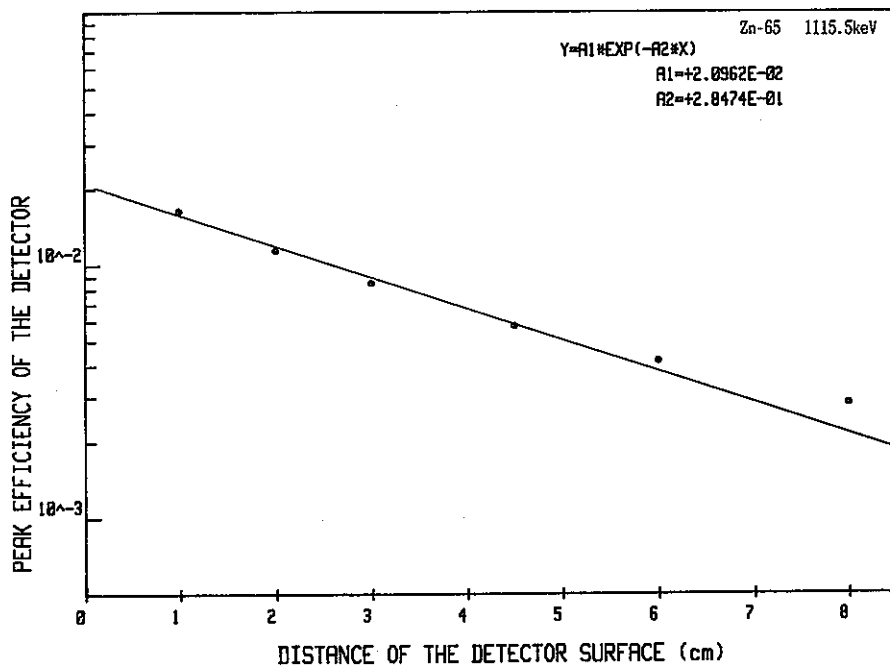
－1

－2

垂直方向移動誤差

70 60 50 40 30 20 10 0 -10 -20 -30 -40 -50 -60 -70 mm

水平方向移動ポイント

図－17　水平方向移動ポイントにおける垂直方向誤差

図－18 位置精度とピーク計数効率

図－19　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング（Am-241）

図－20①　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20② 空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

図－20③ 空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20④　空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

図－20⑤　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20⑥　空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

図－20⑦　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20⑧　空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

図－20⑨　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20⑩　空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

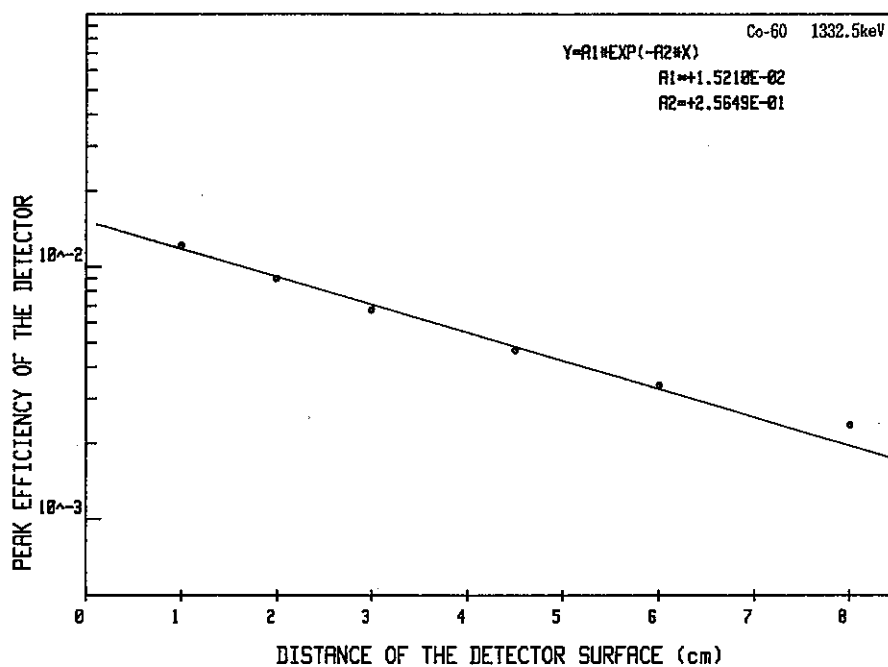
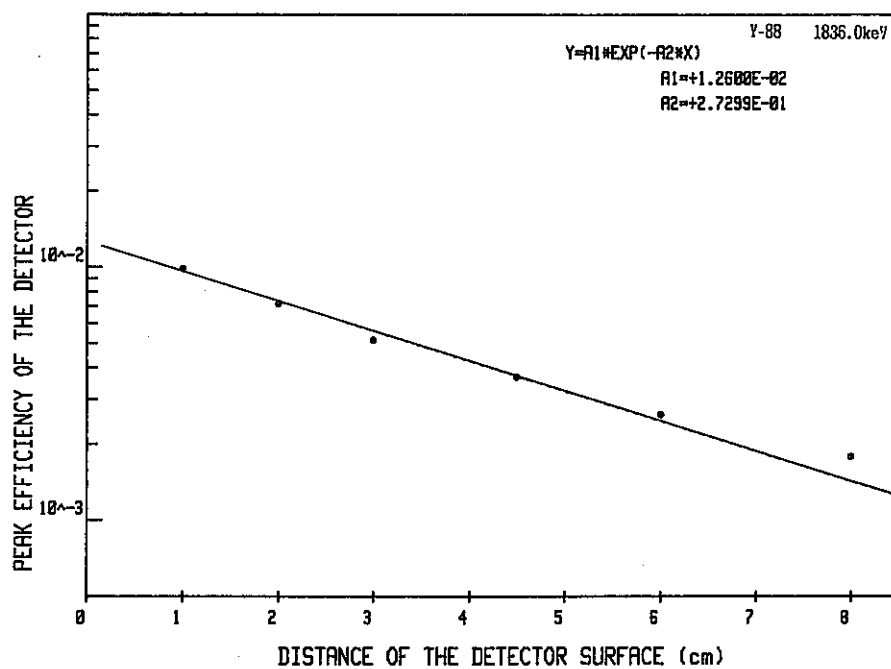
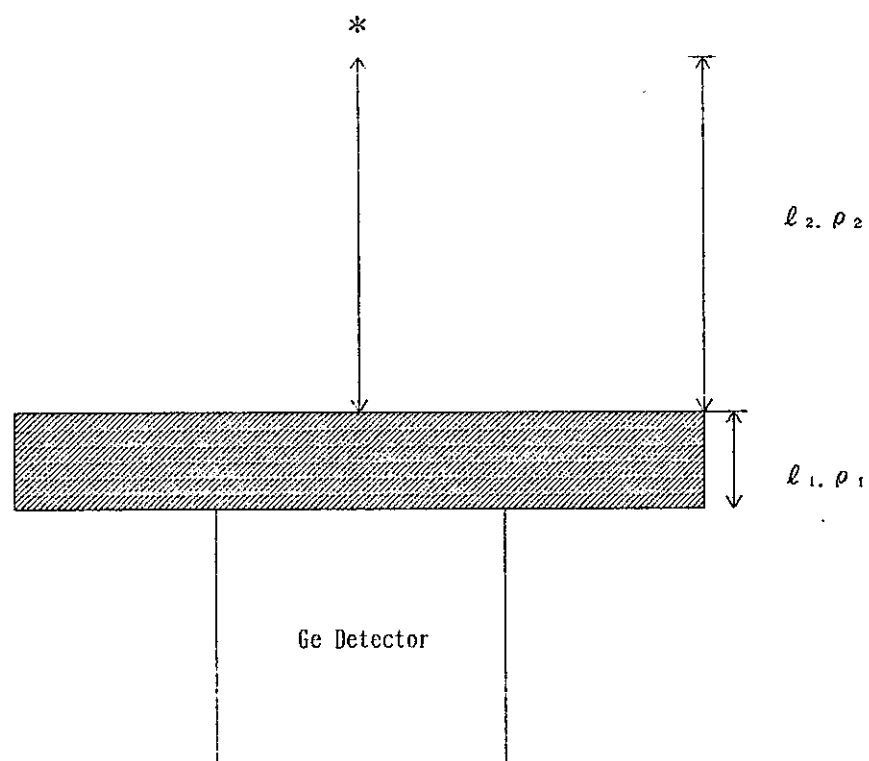
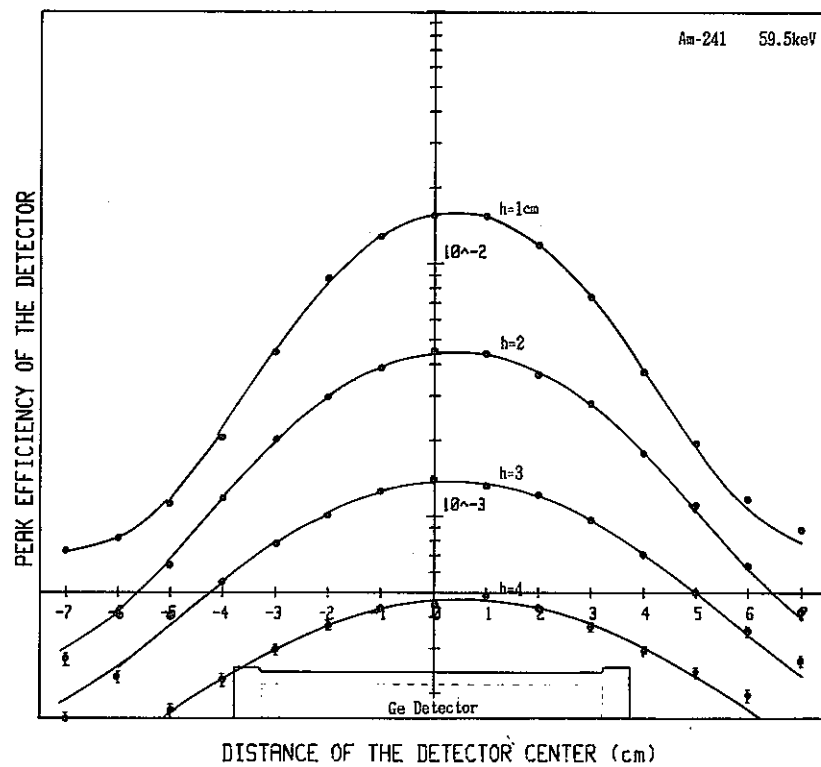
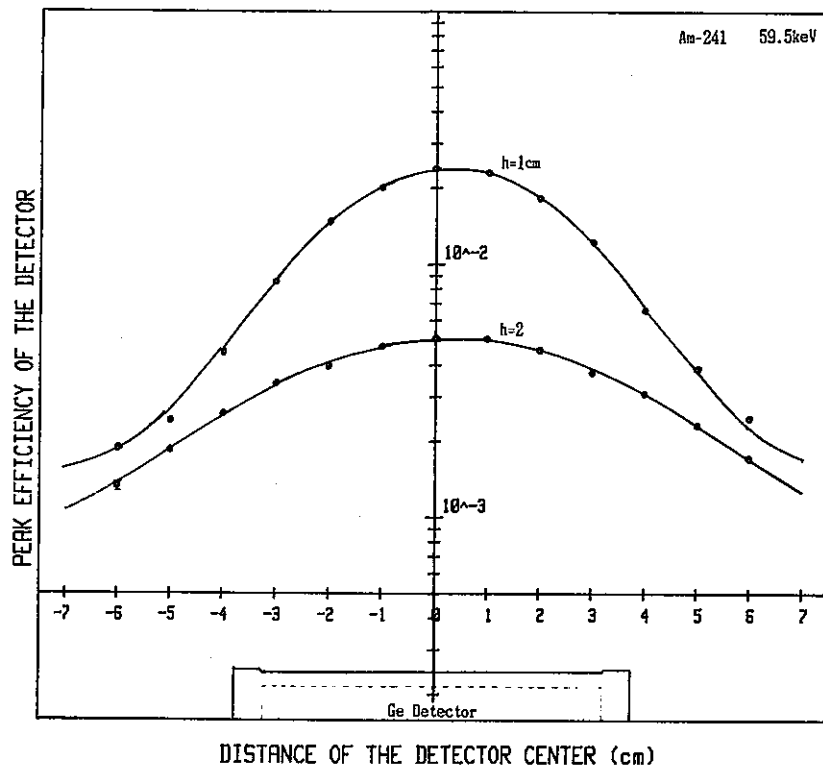
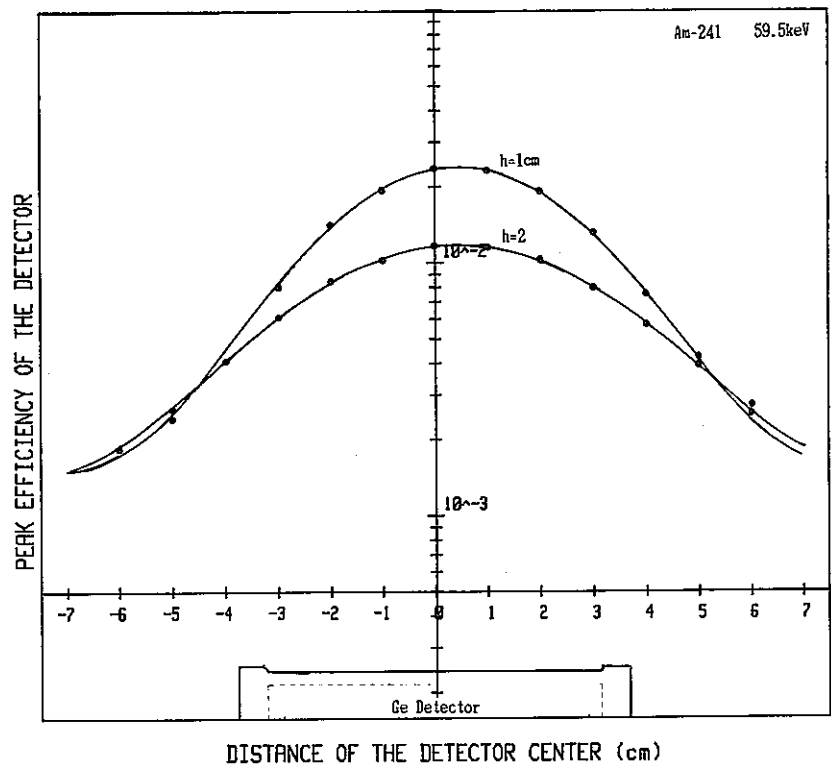
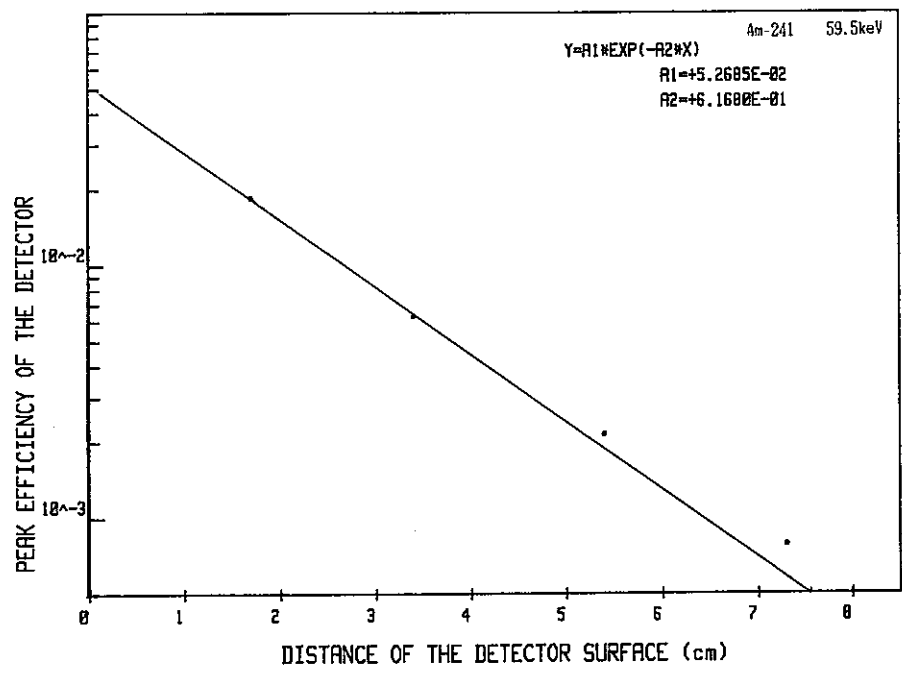
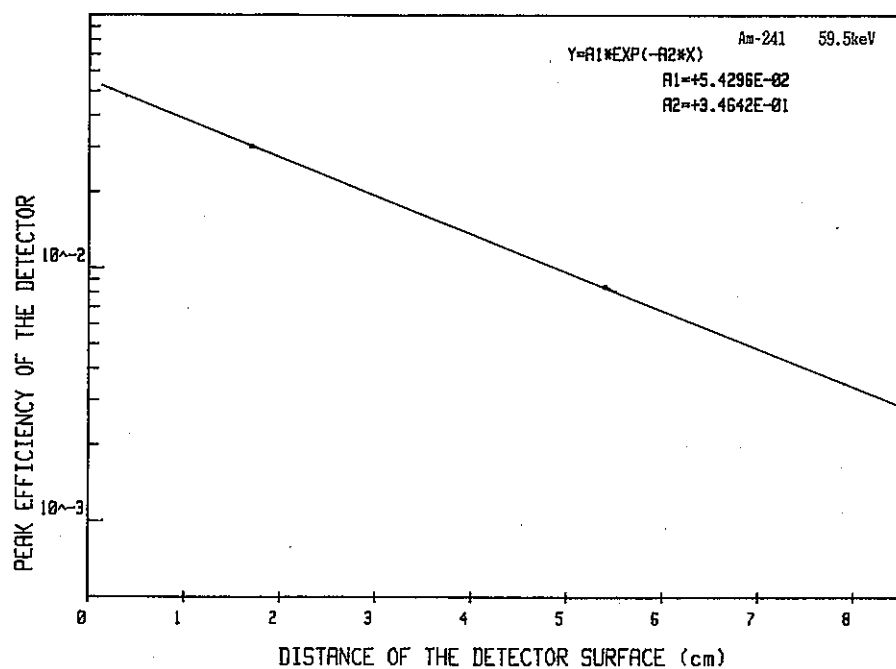
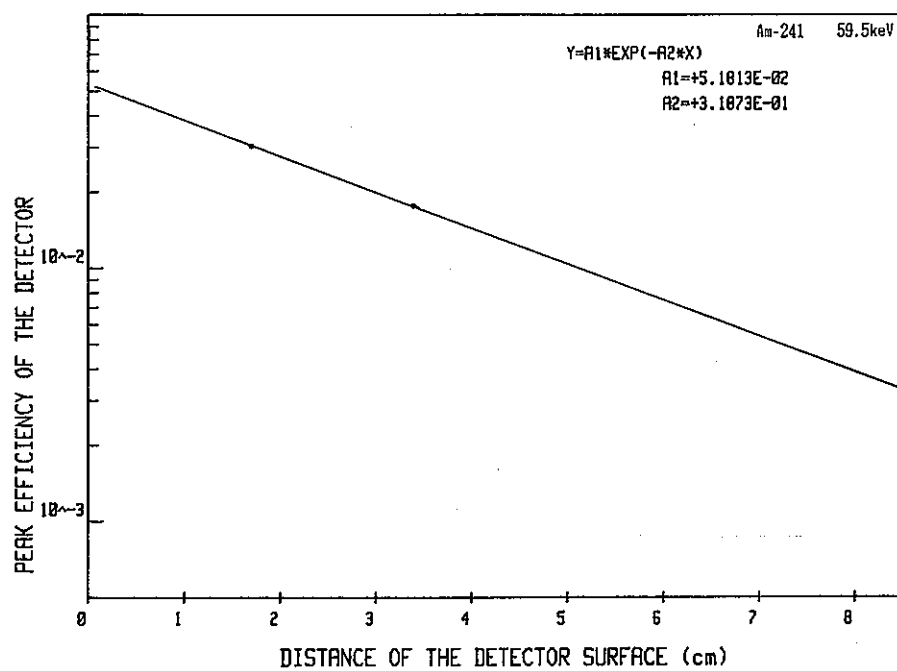
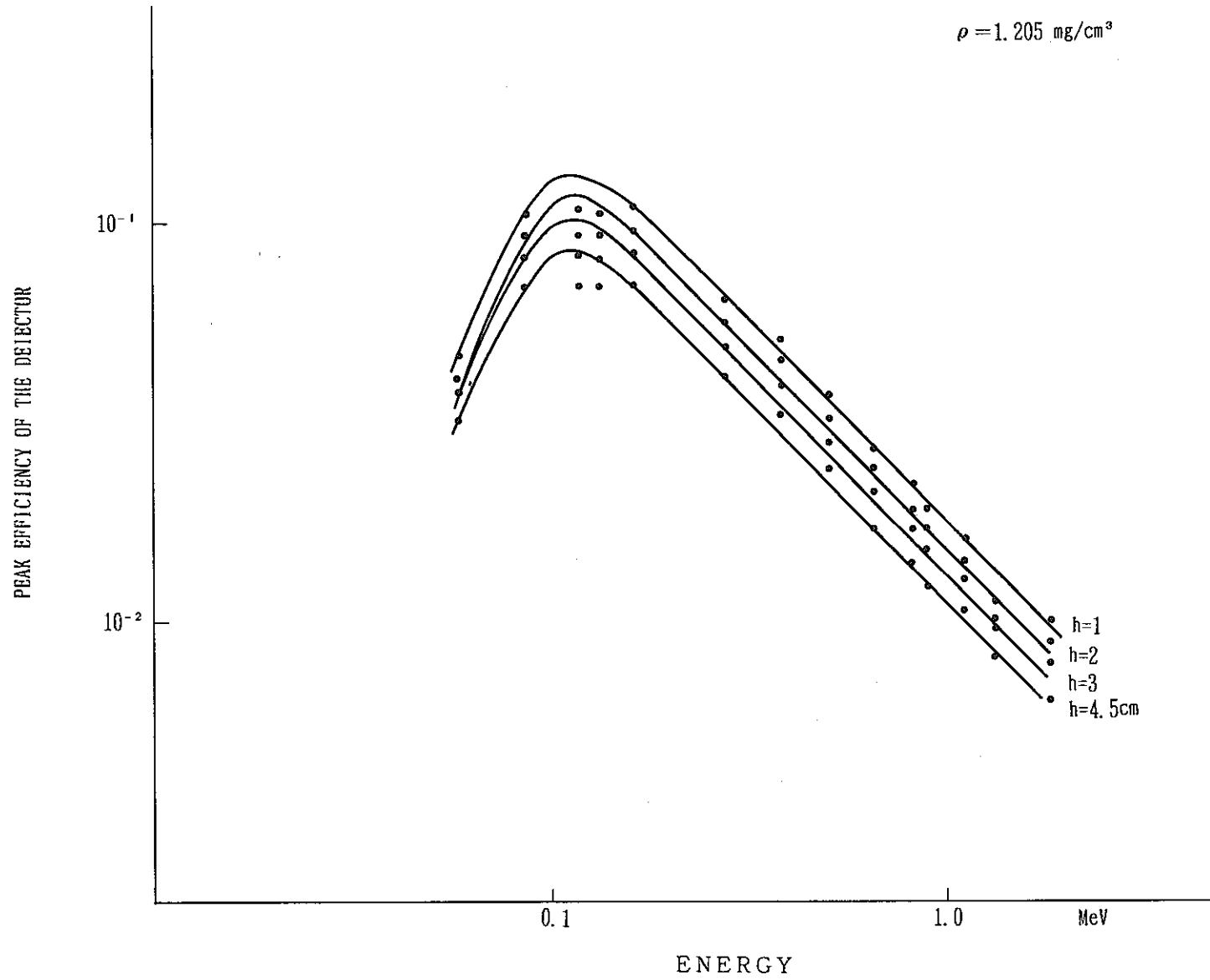
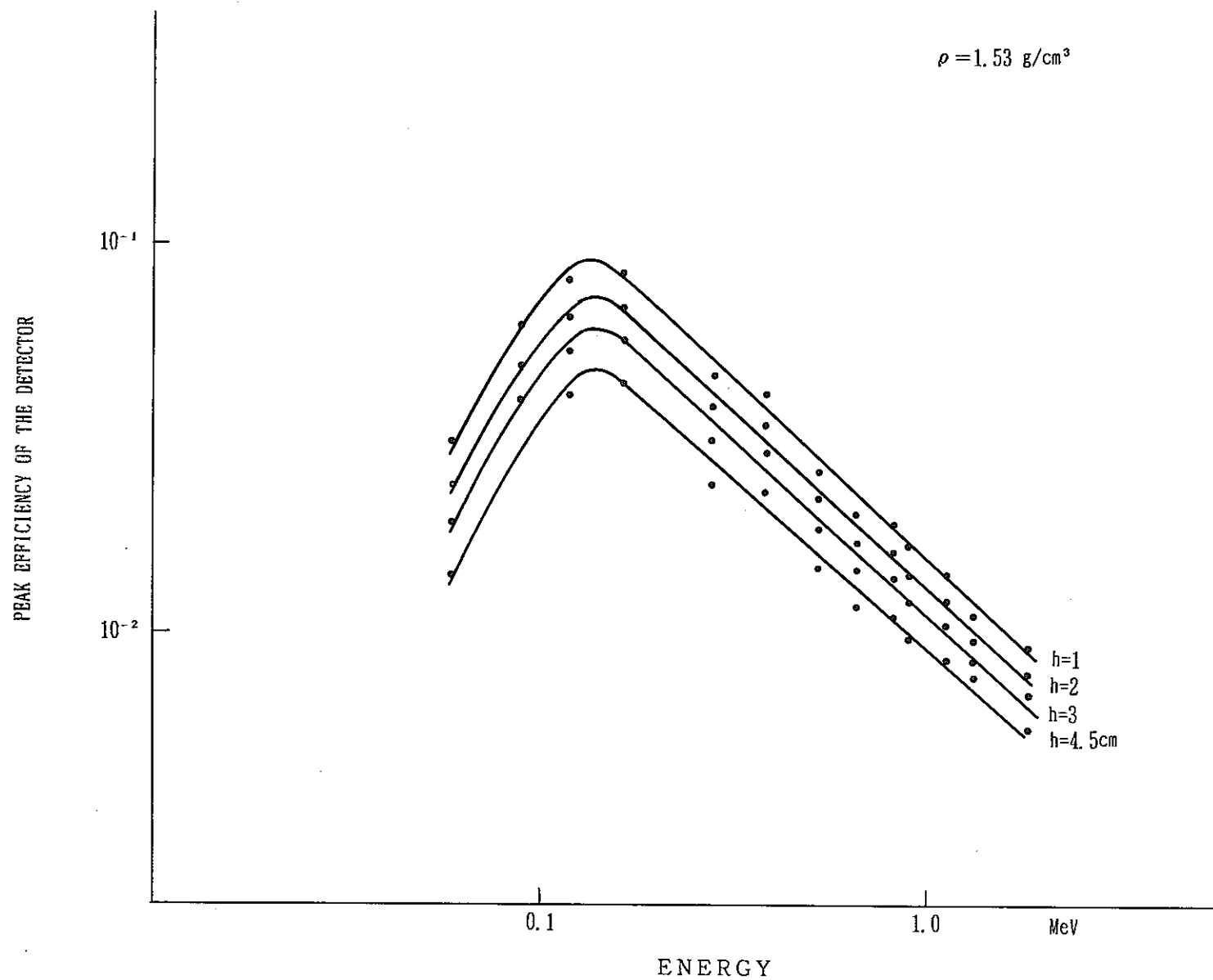
図－20⑪　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－20⑫　空間分布ピーク計数効率Gauss関数フィッティング

図－20⑬　空間分布ピーク計数効率のGauss関数フィッティング

図－21① 面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21② 面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21③　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21④　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑤　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑥　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑦　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑧　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑨ 面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑩ 面線源のピーク計数効率と高さ関係

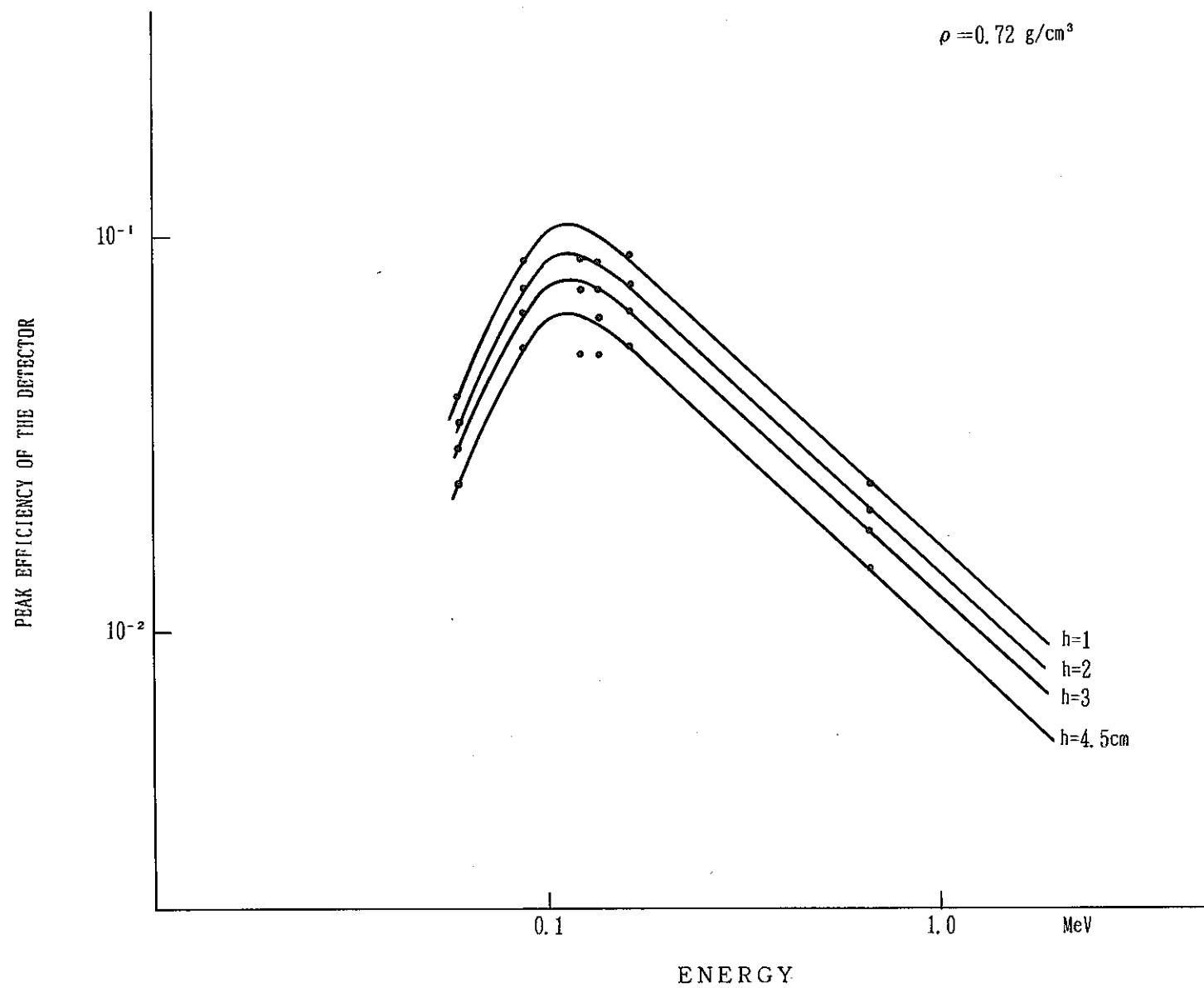
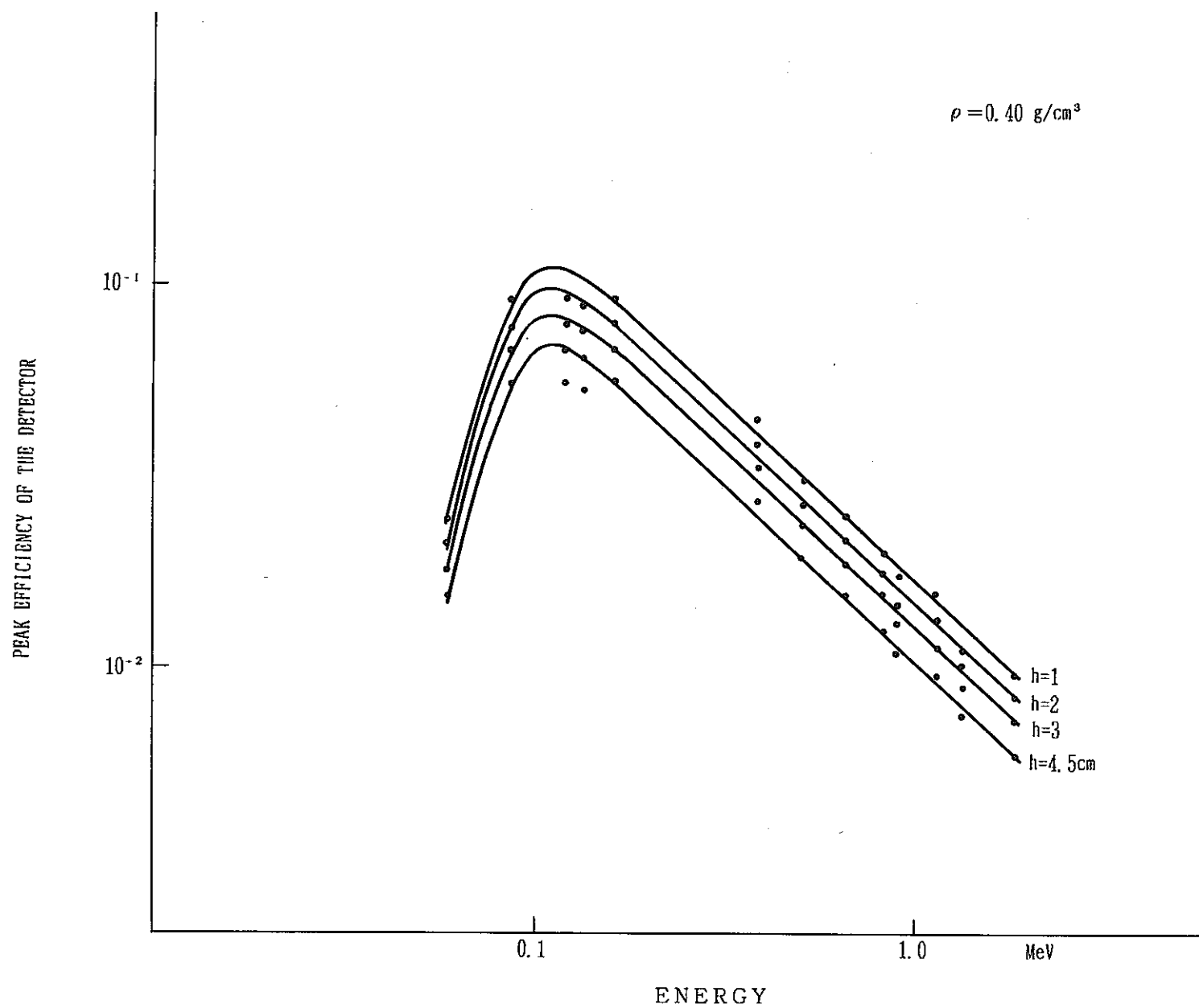
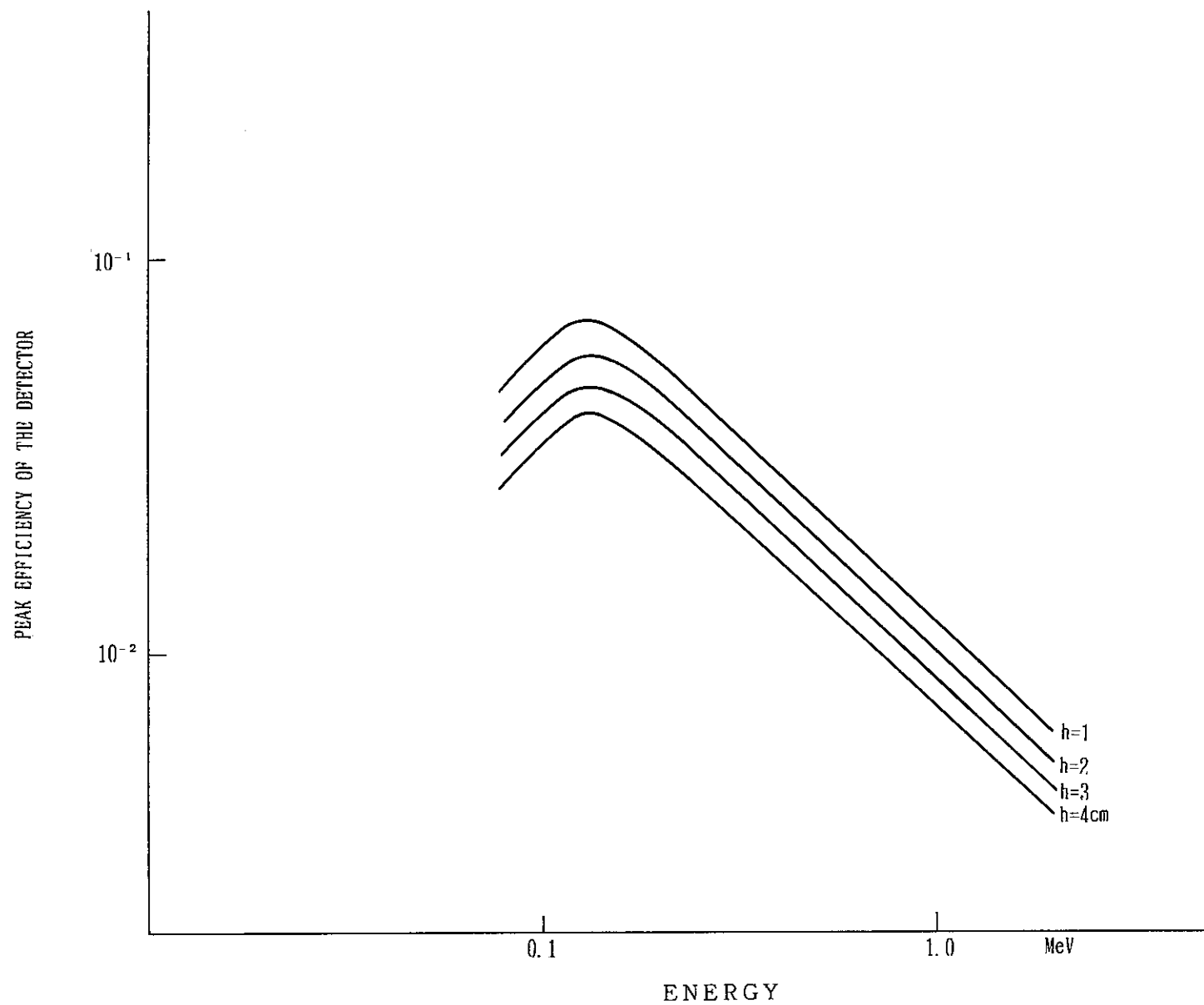
図－21⑪　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑫　面線源のピーク計数効率と高さ関係

図－21⑬　面線源のピーク計数効率と高さ関係

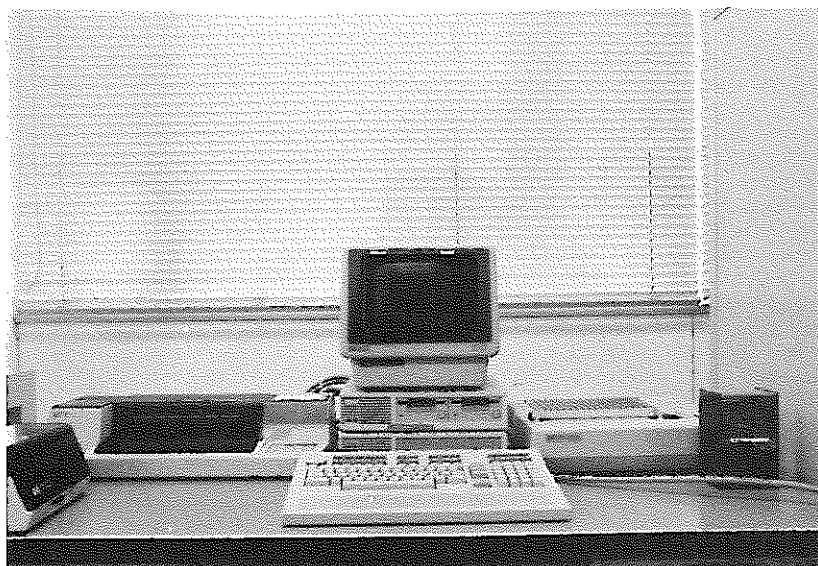
図－21⑭　面線源のピーク計数効率と高さ関係

$$\rho = \frac{\ell_1 \rho_1 + \ell_2 \rho_2}{\ell_1 + \ell_2}$$

図－22　自己吸収補正手法概要図

図－23　空間分布ピーク計数効率のGauss 関数フィッティング(ｱﾙﾐﾆｳﾑ)

図－24　空間分布ピーク計数効率のGauss 関数フィッティング(ｱｸﾘﾙ)

図－25　空間分布ピーク計数効率のGauss 関数フィッティング(ﾓﾚｷｭﾗｼｰﾌﾞｽ)

図－26　面線源のピーク計数効率と高さ関係(ｱﾙﾐﾆｳﾑ)

図－27　面線源のピーク計数効率と高さ関係(ｱｸﾘﾙ)

図－28　面線源のピーク計数効率と高さ関係(ﾓﾚｷｭﾗｼｰﾌﾞｽ)

図－29　容積線源としてのピーク計数効率（空気中）

図－30　容積線源としてのピーク計数効率（アルミニウム）

PNC 19410 87-026

図－31　容積線源としてのピーク計数効率（アクリル）

図－32　容積線源としてのピーク計数効率（モレキュラシーブス）

図－33　比較用容積線源ピーク計数効率（ρ＝0.4）

写 真 目 次

写真－１　小型ロボット外観

写真－２　卓上ディスクトップコンピュータ外観

写真－３　効率算出用γ線スペクトル測定

写真－４　吸収体使用γ線スペクトル測定